



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT  
GÖTTINGEN

Fakultät für  
Physik 

## **Bachelorarbeit**

# **Experimentelle Untersuchungen zur Anwendbarkeit einer Kraftmesstechnik basierend auf optischer Objektverfolgung in CCD-Kameraaufnahmen**

## **Experimental investigations on the applicability of a force-measurement technique utilizing CCD camera-based optical object-tracking**

angefertigt am Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik  
von Sabrina Rutschmann aus Göttingen

**Bearbeitungszeit:** 27. April 2009 bis 3. August 2009

**Betreuer/in:** Dr. Jan Martinez Schramm

**Erstgutachter/in:** Prof. Dr. Andreas Dillmann

**Zweitgutachter/in:** Prof. Dr. Wolfgang Glatzel



# Zusammenfassung

Im Hochenthalpiekanal Göttingen (HEG) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) soll im Rahmen des EXOMARS-Projektes erstmalig eine berührungslose Kraftmesstechnik eingesetzt werden. Eine Hochgeschwindigkeitskamera nimmt die Bewegungstrajektorie eines freifliegenden Modells auf, aus der mit einer computergestützten Objektdetektion auf die angreifenden Kräfte rückgeschlossen werden soll.

Ziel dieser Arbeit soll es sein, die Genauigkeit und damit die Anwendbarkeit der Kraftmessung mittels der optischen Objektverfolgung für die Messungen im HEG zu testen.

Es werden zunächst Experimente durchgeführt, die die Genauigkeit der Positionsbestimmung ermitteln sollen. Basierend auf diesen Ergebnissen wird die Genauigkeit der Beschleunigungsmessung untersucht, indem Versuche mit einem frei fallendem Objekt durchgeführt werden, welches der bekannten Erdbeschleunigung unterliegt. Die Versuche zur Positionsbestimmung ergaben, dass die Position des Objektes sich auf ein fünfzigstel Subpixel genau ermitteln lässt und die Beschleunigung genau genug bestimmt werden kann, sodass eine Anwendung im HEG möglich ist.

**Stichwörter:** Kraftmesstechnik, Beschleunigungsmessung, optische Objektverfolgung, Subpixel Genauigkeit, HEG

## Abstract

In the upcoming EXOMARS-project, a non-intrusive force measurement technique using a high-speed visualisation-based tracking will be employed for the first time in the High Enthalpy Shock Tunnel (HEG) of the German Aerospace Center (DLR). Software detects the trajectory of a free-flying object from the image sequence obtained from a high-speed camera, allowing the derivation of the accelerations and the effective forces.

This bachelor thesis intends to test the accuracy and the applicability of the optical force measurement technique for the HEG.

The first experiments are to identify the error in position detection. Based on this, the error in acceleration measurements are investigated by performing drop experiments with a free falling object affected by gravity, the value of which is commonly known. The results from the accuracy measurements indicate, that the object position can be detected to close to 1/50 of a pixel and the acceleration measurement with the optical object-tracking system is precise enough for application in the HEG.

**Keywords:** force/acceleration measurement, optical object tracking, subpixel resolution, HEG



# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>vii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Optisches Aufnahmesystem . . . . .	3
2.1.1 CCD-Chip . . . . .	3
2.1.2 HPV-1 Kamera . . . . .	5
2.1.3 Verwendetes Objektiv . . . . .	5
2.1.4 Ulbrichtkugel . . . . .	6
2.1.5 Diffusorplatte . . . . .	6
2.2 Theorie zu den Experimenten . . . . .	6
2.2.1 Fallexperimente - konstante Beschleunigung . . . . .	6
2.2.2 Theoretischer Wert der Erdbeschleunigung in Göttingen . . . . .	10
2.2.3 Erwarteter Fehler der Beschleunigung . . . . .	11
2.3 Die Funktionsweise der Bildverarbeitungssoftware zur Auswertung der Messdaten . . . . .	13
2.3.1 Der Canny Edge Detector . . . . .	13
2.3.2 Subpixelkantenroutine . . . . .	14
2.3.3 Objektdetektion . . . . .	15
<b>3 Kamerakalibrierung</b>	<b>17</b>
3.1 Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .	17
3.2 Ergebnisse der Kamerakalibrierung . . . . .	18
3.2.1 Dunkelstrom . . . . .	18

3.2.2	Helligkeitsabhängigkeit . . . . .	21
3.2.3	Spezielle Probleme der HPV-1 Kamera . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Statische Messung</b>	<b>27</b>
4.1	Kugelverschiebungen um geometrische Distanzen . . . . .	27
4.1.1	Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .	27
4.1.2	Ergebnisse . . . . .	28
4.2	Kugelverschiebungen um optische Distanzen . . . . .	30
4.2.1	Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .	30
4.2.2	Ergebnisse . . . . .	31
4.3	Diskussion/Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Fallexperimente</b>	<b>43</b>
5.1	Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .	43
5.2	Ergebnisse der Fallexperimente . . . . .	44
5.2.1	Fallexperimente mit der kleinen Kugel ( $d=30$ mm) bei einer Aufnahmefrequenz von $f=2000$ fps . . . . .	45
5.2.2	Fallexperimente mit der kleinen Kugel ( $d=30$ mm) bei einer Aufnahmefrequenz von $f=4000$ fps . . . . .	46
5.2.3	Fallexperimente mit der großen Kugel ( $d=40$ mm) bei einer Aufnahmefrequenz von $f=4000$ fps . . . . .	47
5.3	Diskussion der Fallexperimente . . . . .	49
5.3.1	Probleme bei der Durchführung der Experimente . . . . .	49
5.3.2	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Anwendung der Ergebnisse für die ExoMars-Kampagne im HEG</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>53</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>55</b>

# Nomenklatur

## Variablen

Variable	Bedeutung	Einheit
$a$	Beschleunigung	$\text{m/s}^2$
$\alpha$	Winkel	$[\text{rad}]$
$A$	Fläche	$\text{m}^2$
$E$	Energie	$\text{J}=\text{kgm}^2/\text{s}^2$
$d$	Durchmesser	$\text{m}$
$F$	Kraft	$\text{N}=\text{kgm}/\text{s}^2$
$f$	Frequenz	$1/\text{s}$
$\eta$	dynamische Viskosität	$\text{Ns}/\text{m}^2$
$L$	Leuchtstärke	$\text{lx}$
$m$	Masse	$\text{kg}$
$M$	Machzahl	-
$n$	Bildanzahl	-
$h$	Höhe	$\text{m}$
$p$	Druck	$\text{N}/\text{m}^2$
$r$	Radius	$\text{m}$
$s$	Strecke	$\text{m}$
$S$	Auflösung	$\mu\text{m}/\text{pixel}$
$\sigma_x$	Fehler des Ortes	$\text{m}$
$t$	Zeit	$\text{s}$
$T$	Temperatur	$\text{K}$
$U_\infty$	Strömungsgeschwindigkeit	$\text{m}/\text{s}$
$v$	Geschwindigkeit	$\text{m}/\text{s}$
$\varphi$	Breitengrad	$[\text{rad}]$

## Indizes

Index	Bedeutung
B	Belichtung
C	Chip
gem.	gemessen
O	Objektiv

## Konstanten

Konstante	Bedeutung	Wert
$g$	Schwerebeschleunigung	$9,8116 \text{ m/s}^2$

## Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
CCD	Charged Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ESA	European Space Agency
GPS	Global Positioning System
fps	frames per second
HEG	Hochenthalpiekanal Göttingen
max	maximal
px	Pixel (Picture Element)
VF	Verstärkungsfaktor (Gain)



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Schema des EXOMARS-Modells im HEG (Rechnung: A. Mack, DLR Göttingen) . . . . .	7
2.2	3D-Darstellung der zurückgelegten Strecke des EXOMARS-Modells im HEG in Abhängigkeit vom Radius und vom Staupunktdruck . . . . .	9
2.3	Theoretisch zu erwartende gesamte Fallstrecke der Kugel (links), und Fallstrecke pro Einzelbild der Kugel (rechts) bei $f = 2000$ fps . . . . .	10
2.4	Schematische Erklärung der Subpixelkantendetektion - Links: Intensitätsdarstellung einer Kante, Rechts: Ableitung der Kante und Approximation . . . . .	15
3.1	Aufbau der Kamerakalibrierung (schematisch und Foto) . . . . .	17
3.2	Dunkelstrom in Abhängigkeit von der Belichtungszeit und vom Verstärkungsfaktor . . . . .	18
3.3	Anzahl der Hotpixel bei der HPV-1 Kamera in Abhängigkeit vom Verstärkungsfaktor . . . . .	19
3.4	Prozentualer Anteil des Fixmuster-Rauschens abhängig vom Verstärkungsfaktor und von der Belichtungszeit . . . . .	20
3.5	Helligkeitslinearitätsbestimmung: Intensitätswerte bei verschiedenen Verstärkungen aufgetragen über der Belichtungszeit bei maximaler Beleuchtung . . . . .	21
3.6	Lineare Approximation der Helligkeitsabhängigkeit des CCD-Chips für verschiedene Verstärkungsfaktoren in Abhängigkeit von der Belichtungszeit . . . . .	22
3.7	Helligkeitsverhalten des Chips im mittleren Dynamikbereich: Intensitätswerte bei verschiedenen Verstärkungen aufgetragen über der Belichtungszeit mit und ohne Optik (Messwerte durch Splines verbunden) . . . . .	24

3.8	Kubische Approximation der normierten Intensitätswerte bei verschiedenen Verstärkungen in Abhängigkeit von der Belichtungszeit - Links mit und rechts ohne Objektiv . . . . .	25
3.9	Intensität über eine Bildserie . . . . .	26
4.1	Versuchsaufbau für die statische Messung (links) und Bild der Kugel aus der Kameraperspektive (rechts) . . . . .	27
4.2	x-Verschiebung innerhalb eines Millimeters - relative und absolute x-Abweichung bei 100% Lichtstärke . . . . .	29
4.3	x-Verschiebung innerhalb eines Millimeters - relative und absolute x-Abweichung bei 50% Lichtstärke . . . . .	29
4.4	x-Verschiebung innerhalb eines Pixels in $30\mu\text{m}$ Schritten, absolute x-Abweichung . . . . .	31
4.5	x-Verschiebung innerhalb eines Pixels, absolute x-Abweichung bei Gain 5 - links in Mikrometern, rechts in Pixeln . . . . .	32
4.6	x-Verschiebung um $400\mu\text{m}$ bei Gain 5, gefittete absolute x-Abweichung	33
4.7	x-Verschiebung innerhalb eines Pixels bei Gain 5, absolute z-Abweichung - links in Mikrometer, rechts in Pixeln . . . . .	34
4.8	x-Verschiebung um $400\mu\text{m}$ bei Gain 5, gefittete absolute z-Abweichung	35
4.9	absoluter Fehler in der Positionsbestimmung bei der Verschiebung der kleinen Kugel um $175\mu\text{m}$ . . . . .	36
4.10	x-Verschiebung innerhalb eines Pixels, absolute x-Abweichung bei Gain 1 - links in Mikrometer, rechts in Pixeln . . . . .	37
4.11	x-Verschiebung innerhalb eines Pixels, z-Abweichung bei Gain 1 - links in Mikrometer, rechts in Pixeln . . . . .	37
4.12	x-Verschiebung um $400\mu\text{m}$ bei Gain 1, gefittete absolute z-Abweichung	38
4.13	x-Verschiebung innerhalb eines Pixels in $20\mu\text{m}$ Schritten bei der festgeschraubten Kugel $d = 39,9\text{ mm}$ , absolute x-Abweichung . . . . .	39
4.14	Fehler in der Positionsbestimmung bei künstlich erzeugten Bildern - Links: Große Kugel, Rechts: Kleine Kugel . . . . .	40
5.1	Versuchsaufbau für die Fallexperimente . . . . .	43
5.2	Darstellung der fallenden Kugel ( $d=30\text{ mm}$ ) zu verschiedenen Aufnahmezeiten bei einer Messung mit $f=2000\text{ fps}$ , Verstärkungsfaktor 5 . . . . .	44

5.3	Graphische Darstellung bei einer Messung mit $f=2000$ fps, Verstärkungsfaktor 5, Kugel $d = 30$ mm . . . . .	46
5.4	Graphische Darstellung bei einer Messung mit $f = 4000$ fps, Verstärkungsfaktor 15, Kugel $d = 30$ mm . . . . .	47
5.5	Graphische Darstellung einer Messung mit $f = 4000$ fps, Verstärkungsfaktor 15, Kugel $d = 40$ mm . . . . .	48
6.1	Verlauf des Staudruckes bzw. der Beschleunigung unter Bedingungen der EXOMARS-Kampagne im HEG . . . . .	51
6.2	Verlauf des Fehlers der Beschleunigung über die Anzahl der Bilder für das EXOMARS-Modell während einer Messzeit von 0,8 ms . . . .	52



# Tabellenverzeichnis

2.1	Wichtige Kameraparameter ([18]) . . . . .	5
2.2	Typische Werte bei der Messung im HEG . . . . .	7
2.3	Theoretisch zu erwartende Parameter der Fallbewegung . . . . .	10
3.1	Gewichtete Mittelwerte der Dunkelwerte bei verschiedenen Verstärkungsfaktoren . . . . .	19



# 1 Einleitung

Im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) werden im Hochenthalpiekanal Göttingen (HEG) Modelle in Überschallströmungen unter anderem unter Wiedereintrittsbedingungen in die Atmosphäre getestet. Beim HEG handelt es sich um den größten Stoßwellenkanal Europas. In diesem Kanal werden unter anderem die angreifenden Kräfte in sehr kurzen Zeiten gemessen. Die typische Messzeit des HEG liegt zwischen 1-4 ms.

Im Rahmen der EXOMARS-Kampagne soll nun erstmalig ein kapselförmiges Modell im Kanal frei fliegen und mithilfe eines optischen Aufnahmesystems die wirkende Beschleunigung ermittelt werden.

Der Vorteil der optischen und berührungsfreien Kraftmesstechnik gegenüber anderen Kraftmesstechniken ist, dass die Interpretation der Daten weniger aufwendig ist, da nur die Bewegungstrajektorie abgeleitet werden muss, um die Beschleunigung zu erhalten. Wohingegen bei anderen Kraftmesstechniken, bei denen das Modell fest im Kanal montiert ist, die Kraft aus dem gesamten Strömungsfeld um das Modell rückgerechnet werden muss, dieser Weg ist weitaus komplizierter.

EXOMARS ist eine Mission der Europäischen Weltraumorganisation (ESA), die voraussichtlich im Jahr 2013 startet. Dabei soll mit einer Kapsel ein Rover zum Mars gebracht werden, der dort nach Spuren von Leben suchen soll.

Damit die Kapsel mit dem Rover auch auf der Marsoberfläche sicher landen kann, werden die auf sie wirkenden Kräfte im HEG simuliert und gemessen. Diese Messungen geschehen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera, welche die Bewegung des Modells aufnimmt. Eine Software erkennt die Form des Objektes auf den Bildern, aus der Bewegung des Objektes wird dann die Beschleunigung und die daraus resultierende Kraft ermittelt.

Um festzustellen, inwiefern eine Anwendung im HEG möglich und wie groß der zu erwartende Fehler in der Objektverfolgung sein wird, sollen in dieser Arbeit die Grenzen der optischen Kraftmesstechnik aufgezeigt werden.

## 1 Einleitung

Zunächst werden in zwei Schritten Eigenschaften der Kamera untersucht. Zum Einen die Charakteristika des CCD-Chips: Hier werden charakteristische Eigenschaften, wie das Helligkeitsverhalten und Besonderheiten des CCD-Chips und deren Einflüsse auf die späteren Messungen ermittelt. Zum Anderen die Genauigkeit der Kamera und des Auswerteverfahrens in der Positionsbestimmung (“Statische Messung”): Durch Aufnahmen eines unbewegten Objektes, welches nach jeder Aufnahme um nur wenige  $\mu m$  verschoben wird, sollen die Grenzen in der Auflösung sowie die Genauigkeit der Positionsbestimmung ermittelt werden.

Um Bedingungen zu simulieren, die denen im HEG ähnlich sind (Beleuchtung, Aufnahmedauer, Maximalbewegung des Objektes), werden schließlich Experimente mit einer fallenden Kugel durchgeführt. Die Beschleunigung im HEG ist während der Messzeit annähernd konstant. Die Erdbeschleunigung ist in hinreichender Genauigkeit bekannt. Daher bietet es sich an, das optische Messsystem für beschleunigte Bewegungen mit einer Fallbewegung zu testen.

Ziel dieser Arbeit soll es demnach sein, die Genauigkeit und damit die Anwendbarkeit der Kraftmessung mithilfe der optischen Objektverfolgung für den HEG und hiermit auch für die EXOMARS-Messungen zu testen.

In der vorliegenden Arbeit werden im ersten Abschnitt die theoretischen Grundlagen des optischen Aufnahmesystems und der durchgeführten Experimente sowie die Funktionsweise der Objektdetektionssoftware erläutert. Anschließend werden die Experimente ausgewertet und im Hinblick auf die spätere Anwendbarkeit diskutiert.



## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Optisches Aufnahmesystem

Die Bewegung der Kugel wird mithilfe der Hochgeschwindigkeitskamera HPV-1 der Firma SHIMADZU aufgenommen. Diese besitzt einen CCD-Chip mit einer Auflösung von 10bit in einem Farbkanal (grau), was 1024 Intensitätsabstufungen entspricht (0=schwarz bis 1023=weiß).

#### 2.1.1 CCD-Chip

CCD steht für *charged-coupled device*. Der Chip besteht aus einer Matrix mit lichtempfindlichen Fotodioden, bei denen, aufgrund des photoelektrischen Effekts, auftreffende Photonen Elektronen freisetzen. Das ausgegebene Signal ist proportional zur eingestrahnten Lichtmenge. Diese CCD-Sensormatrix wird als CCD-Flächensensor bezeichnet (Desweiteren gibt es CCD-Liniensensoren, dabei handelt es sich nicht um eine Matrix, sondern um eine einzige CCD-Sensorzeile). Die Ladungen werden zunächst, während der Belichtung, in einem Potentialtopf, welcher als Pixel bezeichnet wird, gesammelt und am Ende zum Ausleseverstärker verschoben, wo diese nacheinander seriell ausgelesen werden [1, 11].

Ein Problem bei CCDs stellt das so genannte *Blooming* dar. Dabei handelt es sich um eine Überbelichtung. Ist ein Pixel "voll" verteilt sich die restliche Ladung auf die Nachbapixel [11, 16].

Je größer ein Pixel, desto mehr Licht kann es aufnehmen. Infolgedessen steigt die Lichtempfindlichkeit. Die Auflösung wird mit zunehmender Größe geringer. Das Signal-Rausch-Verhältnis ist bei einem größeren Chip allerdings besser.

Der Vorteil von CCDs gegenüber CMOS besteht in der Tatsache, dass sie sehr lichtempfindlich sind. Zudem haben sie ein breites Spektrum, vom sichtbaren Licht bis zum infraroten Bereich, dies hat eine breit gefächerte Verwendbarkeit zur Folge, im Gegensatz zu den günstigeren und qualitativ bezüglich der Bilder minderwertigeren CMOS-Chips [3].

### Bestimmung von wichtigen CCD-Parametern

Da es sich bei einem CCD-Chip um einen Halbleiter handelt, fließen nicht nur Ladungen, sobald ein Photon auf den Chip trifft, sondern die Elektronen und Löcher können aufgrund der thermischen Bewegungen ohne das Zutun eines Photons durch die Sperrschicht diffundieren. Diese Ladungen werden als “Dunkelladungen” bezeichnet. Die Dunkelladung ist proportional zu Belichtungszeit und zeigt abfallendes logarithmisches Verhalten bei Kühlung des Chips [16].

**Dunkelstrom** Das Dunkelladungsverhalten eines CCD-Chips wird im Allgemeinen als **Dunkelstrom** (*Dark Current*) bezeichnet. Diese Zahl gibt an, wie viele Elektronen pro Pixel und Zeiteinheit bei einer bestimmten Chip-Temperatur entstehen. Der Dunkelstrom ist von Chip zu Chip verschieden. Er ist im Allgemeinen höher, je größer die einzelnen Pixel sind [5, 16].

Um den Dunkelstrom zu messen, nimmt man die Bildsequenzen bei geschlossenem Objektiv und verschiedenen Belichtungszeiten auf.

Gäbe es den Dunkelstrom nicht, wäre zu erwarten, dass bei geschlossenem Objektiv alle Pixel den Wert “0” haben. Der Dunkelstrom lässt sich demnach über den Helligkeitswert der Pixel quantifizieren, indem aus allen Pixeln die Helligkeit für das gesamte Bild gemittelt wird.

Desweiteren gibt es Pixel, die einen erhöhten Dunkelstrom haben und deren Ladung nicht proportional zum eingestrahlt Licht ist. Diese erscheinen heller als die anderen Pixel und werden deshalb **Hotpixel** genannt [5, 16]. Deren Anzahl ist ebenfalls temperaturabhängig, sie werden in der Regel zusammen mit dem Dunkelstrom gemessen. In dieser Arbeit gilt ein Pixel als Hotpixel, sobald sein Mittelwert drei Standardabweichungen oberhalb des Mittelwertes aller Pixel liegt (vgl. Gröning[5], S.61f).

Zusätzlich gibt es das so genannte **Fixmuster-Rauschen** bzw. *Fixed-Pattern-Noise (FPN)*. Dieses wird mit dem Dunkelstrom zusammen aufgenommen und ist ein konstanter Pixel Offset, das heißt jedes Pixel hat einen eigenen Fehlerwert. Es ist abhängig von der Temperatur, der Belichtungszeit und dem Verstärkungsfaktor (Gain). Dieses wird wie folgt berechnet [13]:

$$FPN = \frac{\sigma}{\text{Maximalwert}} \quad (2.1)$$

Bei  $\sigma$  handelt es sich um die Standardabweichung bei der Pixelhelligkeitsberechnung, der Maximalwert ist der hellste Wert, der möglich ist. Bei dem Chip der HPV-1 Kamera handelt es sich um einen 10 Bit Chip, das bedeutet der Maximalwert ist 1023.

### 2.1.2 HPV-1 Kamera

Bei der entstprechenden Kamera handelt es sich um eine Hochgeschwindigkeitskamera, die maximal eine Million Bilder pro Sekunde aufnehmen kann. Die wichtigsten Daten sind in **Tabelle 2.1** aufgeführt.

Chip	CCD-Sensor
Auflösung	312 (horizontal) x 260 (vertikal) Pixel
Farbe, Abstufung	Monochrom, 10bit
Aufnahmegeschwindigkeit	1 Mfps, 500 kfps, 250 kfps, 125 kfps, 63 kfps, 32 kfps, 16 kfps, 8 kfps, 4 kfps, 2 kfps, 1 kfps, 500 fps, 250 fps, 125 fps, 63 fps, 30 fps
Gespeicherte Bilder	102
Belichtungsfaktor	1/2, 1/4, 1/8
Verstärkungsfaktor (Gain)	1, 1.5, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 50
interne Kühlung	5°C- 20°C

Tab. 2.1: Wichtige Kameraparameter ([18])

Die Kamera besteht aus dem Kamerakopf und der Kontrolleinheit (Computer). Sie wird mithilfe einer Software gesteuert, mit dieser alle wichtigen Parameter (Frequenz, Belichtungsfaktor, ...) eingestellt werden. Zusätzlich zum internen Modus, bei dem die Kamera mit der Aufnahme beginnt (sobald man im Programm den "REC" Knopf betätigt) kann man die Kamera auch mithilfe eines externen Triggers starten lassen.

Die Belichtungszeit berechnet sich aus:

$$t_B = \frac{\text{Belichtungsfaktor}}{\text{Frequenz}} \quad (2.2)$$

### 2.1.3 Verwendetes Objektiv

Verwendet wird ein Objektiv der Firma NIKON des Typs "AF Zoom-Nikkor". Es hat eine Brennweite von 28 - 100 mm, die kürzeste Aufnahmedistanz beträgt 0,56 m. Die Blendendaten belaufen sich auf f/3,5-5,6 [10].

### 2.1.4 Ulbrichtkugel

Zur Kalibrierung der Kamera wird eine Ulbrichtkugel der Firma TECHNOTEAM BILDVERARBEITUNG GMBH benutzt (siehe **Abbildung 3.1**). Bei einer Ulbrichtkugel handelt es sich um eine homogene Lichtquelle. Man speist an vier Stellen Licht in die Kugel ein, welches im Inneren vielfach reflektiert wird und infolgedessen als homogenes diffuses Licht gemäß dem LAMBERTschen Gesetz aus der Austrittsöffnung austritt. Eine LAMBERTsche Fläche ist eine Fläche, deren Leuchtdichte vom Betrachtungswinkel unabhängig ist. Ziel ist es, mithilfe dieses Lichtes den CCD-Chip vollständig auszuleuchten, um sein Helligkeitsverhalten zu bestimmen.

### 2.1.5 Diffusorplatte

Die verwendete Diffusorplatte der Firma LASER2000 hat die Maße 133x133 mm und ist 0,18 mm dick. Bei dem Material handelt es sich um "Spektralon". Es hat viele Lufteinschlüsse, daher verhält es sich bezüglich der Lichtstreuung nicht wie ein gewöhnlicher Festkörper. Spektralon hat aufgrund der geringen Dicke ein hohes Transmissionsvermögen und zeigt bei Durchlicht keinerlei Strukturen im Gegensatz zu Papier.

## 2.2 Theorie zu den Experimenten

### 2.2.1 Fallexperimente - konstante Beschleunigung

Der HEG ist ein Stoßwellenkanal, in dem Hyperschallströmungen realisiert werden können. Er besteht aus einem Druckspeicher, einem Kompressionsrohr, dem Stoßrohr, der Düse und der Messstrecke. Ein ca. 300 - 800 kg schwerer Kolben wird mithilfe von komprimiertem Gas durch das Kompressionsrohr auf nahezu Schallgeschwindigkeit beschleunigt. Durch diese Bewegung wird das davorliegende Treibergas quasi adiabatisch komprimiert, was zu einem Druck- und Temperaturanstieg führt. Aufgrund des hohen Drucks platzt die Membran zwischen Kompressions- und Stoßrohr und setzt dadurch eine Stoßwelle in Gang, die zunächst an der Sekundärmembran am Ende des Stoßrohrs reflektiert wird. Vor der Sekundärmembran befindet sich ein Testgas in einem hohen Energieniveau, welches sich durch diesen Vorgang auf bis zu 10.000 K erhitzt wird. Die Sekundärmembran schmilzt und das Testgas gelangt durch die Düse in die Messstrecke und umströmt dort das Modell mit

bis zu  $M = 10$ . Aufgrund des nachströmenden Treibergases beträgt die Messdauer nur ein paar Millisekunden. In der Messstrecke erreicht die Strömung eine annähernd konstante Geschwindigkeit aufgrund des kurzzeitigen annähernd konstanten Druckes. Weitere Kenndaten für den HEG sind in **Tabelle 2.2** aufgeführt [6]. Diese Bedingungen herrschen ebenso bei dem Modell für die EXOMARS-Kampagne. Da es frei aufgehängt wird, wird es am Staupunkt durch die Strömung konstant beschleunigt. Mithilfe der optischen Kraftmesstechnik soll auf diese Beschleunigung und somit die angreifende Kraft rückgeschlossen werden.

Eine schematische Darstellung der EXOMARS-Kapsel in einem HEG-Versuch wird in **Abbildung 2.1** veranschaulicht.

Druckbereich am Staupunkt	0,5 - 10	bar
Typischer Durchmesser von Modellen	20 - 200	mm
Typisches Gewicht	1 - 10	kg
Typische Messdauer	0,5 - 3	ms

Tab. 2.2: Typische Werte bei der Messung im HEG

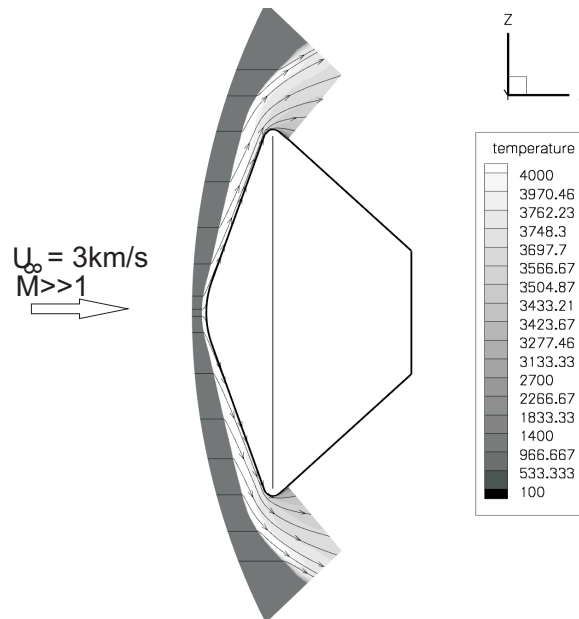


Abb. 2.1: Schema des EXOMARS-Modells im HEG (Rechnung: A. Mack, DLR Göttingen)

## 2 Theoretische Grundlagen

Zunächst soll an dieser Stelle beschrieben werden, wie sich das EXOMARS-Modell im HEG bewegt: Die zurückgelegte Strecke wird, unter der Annahme, dass über den gesamten Zeitraum eine konstante Beschleunigung  $a$  vorliegt, wie folgt berechnet:

$$s = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + s_0 \quad (2.3)$$

Mit  $v_0 = s_0 = 0$  gilt:

$$s = \frac{1}{2}at^2 \quad (2.4)$$

Mit  $F = ma$  und dem Druck am Staupunkt  $p = \frac{F}{A}$  ergibt sich:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{ma}{A} \quad (2.5)$$

Da für das Modell eine kreisförmige Angriffsfläche angenommen werden kann (siehe **Abbildung 2.1**), gilt:

$$A = \pi r^2$$

Wird nun **Gleichung 2.5** nach  $a$  umgeformt und in **Gleichung 2.4** eingesetzt, erhält man als Formel für die zurückgelegte Strecke des Modells im HEG:

$$s = \frac{1}{2} \frac{p\pi r^2}{m} t^2 \quad (2.6)$$

**Gleichung 2.6** ist in **Abbildung 2.2** für ein 10 kg schweres Modell in Abhängigkeit von seinem Radius und dem ausgeübten Druck am Staupunkt aufgetragen. Daraus lässt sich der zu erwartende Zusammenhang aus **Gleichung 2.6** erkennen: ein leichteres Modell fliegt weiter als ein schweres Modell, ebenso sorgt eine größere Angriffsfläche für einen weiteren Flug.

Um Experimente zu realisieren, welche ähnliche Bedingungen wie das EXOMARS-Experiment im HEG haben (eine annähernd konstante Beschleunigung während der Messzeit, ähnliche Aufnahmezeiten, Gesamtbewegungen des Modells), werden für diese Arbeit Fallexperimente mit zwei verschiedenen großen Kugeln durchgeführt. Auf sie wirkt die Erdbeschleunigung als konstante Beschleunigung.

Bei einer fallenden Kugel gilt ebenfalls **Gleichung 2.4**, diesmal mit  $a = g$  und  $s = h$  mit  $h$  als die Höhe aus der die Kugel losgelassen wird. Mit der Messung von  $h$  und  $t$  lässt sich mithilfe der Kamera der Wert für  $g$  bestimmen. Da der theoretische Wert

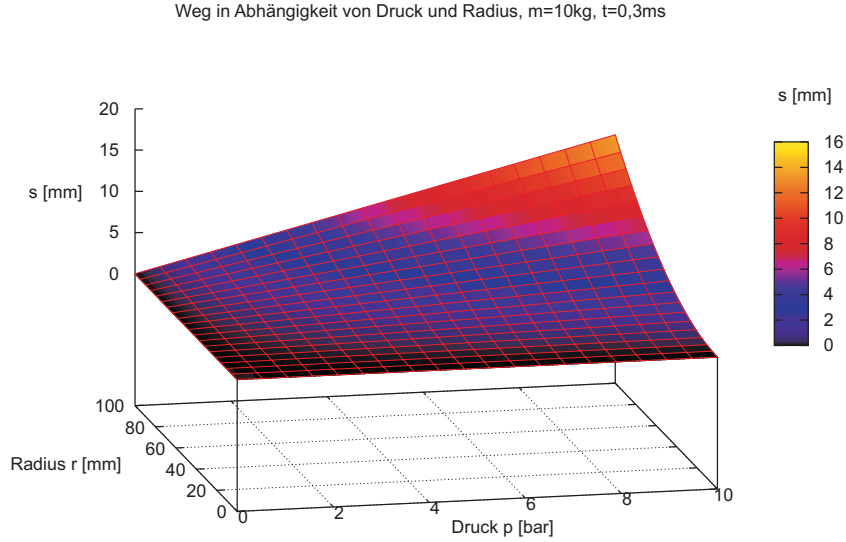


Abb. 2.2: 3D-Darstellung der zurückgelegten Strecke des EXOMARS-Modells im HEG in Abhängigkeit vom Radius und vom Staupunktdruck

bekannt ist, lässt sich so der Fehler bestimmen.

Um zu überprüfen, ob der Luftwiderstand bei der Fallbewegung zu vernachlässigen ist, wird das Gesetz für den Stokes'schen Widerstand verwendet:

$$F = 6\pi r \eta v \quad (2.7)$$

Bei einer Aufnahmefrequenz mit  $f = 2000 \text{ fps}$  beträgt die Aufnahmedauer pro Bild  $t = 1/2000 \text{ s} = 0.5 \text{ ms}$ , mit der theoretischen Erdbeschleunigung von  $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$  lässt sich so die zu erwartende Gesamtfallstrecke über die 101 Bilder, die Durchschnittsgeschwindigkeit pro Bild und die zurückgelegte Strecke pro Bild berechnen. Diese sind in **Tabelle 2.3** aufgeführt.

In **Abbildung 2.3** wird die theoretisch zu erwartende  $y$ - $t$ -Trajektorie und die Fallstrecke pro Einzelbild der Kugel bei einer Aufnahmefrequenz von  $f = 2000 \text{ fps}$  dargestellt.

Es ergibt sich eine Maximalgeschwindigkeit  $v = 0,493 \text{ m/s}$ . Bei  $20^\circ\text{C}$  Raumtemperatur gilt  $\eta \approx 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$ , die Radien der Kugeln sind  $r_1 = 15 \text{ mm}$  und  $r_2 = 20 \text{ mm}$ . Die Luftwiderstände der beiden benutzten Kugeln bei einer Aufnahmefrequenz von  $f = 2000 \text{ fps}$  nach 101 Bildern sind nun:

$$F_1 = 2,51 \cdot 10^{-6} \text{ N} , F_2 = 3,35 \cdot 10^{-6} \text{ N}.$$

## 2 Theoretische Grundlagen

Im Vergleich zu ihrer Gewichtskraft von ca. 1 N also zu vernachlässigen.

Frequenz [fps]	2000	4000
Gesamtzeit [ms]	50,5	25,25
Gesamtstrecke [cm]	1,251	0,313
Endgeschwindigkeit [m/s]	0,493	0,247

Tab. 2.3: Theoretisch zu erwartende Parameter der Fallbewegung

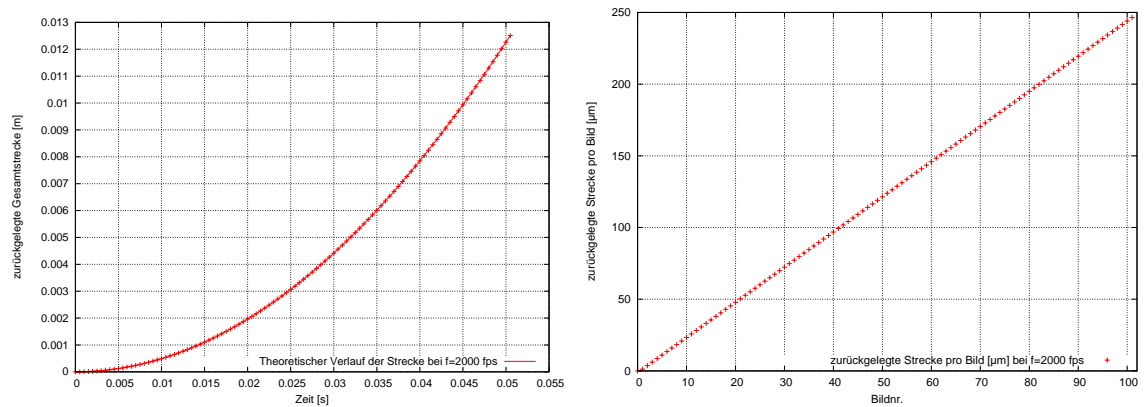


Abb. 2.3: Theoretisch zu erwartende gesamte Fallstrecke der Kugel (links), und Fallstrecke pro Einzelbild der Kugel (rechts) bei  $f = 2000$  fps

### 2.2.2 Theoretischer Wert der Erdbeschleunigung in Göttingen

Um möglichst genaue Aussagen über die auftretenden Fehler machen zu können, ist es nötig, den genauen Wert der Erdbeschleunigung am Ort der Messung zu kennen. Dazu gibt es zwei verschiedene Methoden: Das **Gravitationskonzept nach WELMEC für eichpflichtige Waagen** wurde im Jahr 2000 von der WELMEC Arbeitsgruppe entwickelt, um Gravitationszonen zu bestimmen, welche politisch und verwaltungstechnisch unabhängig sind [17].

Eine Gravitationszone ist als der Streifen definiert, welcher von einem südlichen und einem nördlichen Breitengrad ( $\varphi_1$  und  $\varphi_2$ ) sowie durch eine untere und obere Höhengrenze über dem Meeresspiegel ( $h_1$  und  $h_2$ ) eingegrenzt wird.

Die Fallbeschleunigung bezieht sich dann auf die mittlere geographische Breite  $\varphi_m$  und eine mittlere Höhe über den Meeresspiegel  $h_m$  und lässt sich mithilfe der folgenden Formel bestimmen:



$$g = 9,780318(1 + 0,0053024 \sin^2(\varphi_m) - 0,0000058 \sin^2(2\varphi_m)) - 0,000003085 \cdot h_m \quad (2.8)$$

Da hier der Wert für  $g$  möglichst genau sein soll, wird keine Gravitationszone bestimmt, sondern der Wert direkt am Ort der Messung. Die Koordinaten werden mithilfe eines GPS-Empfängers (Navigationsgerät TomTom) ermittelt und sind für das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt Standort Göttingen vor Haus 13.3: 51,52709°N, 9,92935°O.

Für die Formel nach WELMEC wird allerdings nur der Breitengrad benötigt. Die Höhe über NN ist für Göttingen mit ca. 150 m angegeben. Da sich eine Höhendifferenz von beispielsweise 50 m erst auf die fünfte Nachkommastelle auswirkt, genügt diese Angabe.

So ergibt sich mit **Gleichung 2.8** für die Erdbeschleunigung in Göttingen:

$$g \approx 9,8116 \text{ m/s}^2$$

Allerdings wird dieser Wert ohne Fehler angegeben.

Eine andere Methode ist das **Schwere-Informationssystem (SIS)** der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) [12]. Dieses ist eine Java-Applikation, welche auf der Website der PTB zur Verfügung gestellt wird. Als Koordinaten wurden die Werte des Navigationsgerätes eingegeben, die Höhe über NN hat das System selbstständig ermittelt. Bereits ab der vierten Nachkommastelle ist der Wert fehlerbehaftet und die Rechnung basiert auf 152 Punkten, was sie genauer macht als die WELMEC Formel. Nach dem SIS erhält man für die Schwerebeschleunigung:

$$g \approx 9,81164 \pm 0,00004 \text{ m/s}^2$$

Für die Vergleiche mit den Messwerten (in **Kapitel 5.2**) wird der Wert  $g = 9,8116 \text{ m/s}^2$  verwendet.

### 2.2.3 Erwarteter Fehler der Beschleunigung

Geht man davon aus, dass die Beschleunigung über einen gewissen Zeitraum konstant ist - bei einem HEG Experiment ist sie das über einen kurzen Zeitraum, bei den Fallexperimenten ist die Erdbeschleunigung zu jedem Zeitpunkt konstant - dann

## 2 Theoretische Grundlagen

kann man aus dem bekannten Fehler des Ortes bzw. der Verschiebung des Objektes den zu erwartenden Fehler in der Beschleunigung bestimmen. Für die zurückgelegte Strecke bei einer beschleunigten Bewegung gilt:

$$s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

bzw. in vektorieller Schreibweise für mehrere Einzelexperimente:

$$\hat{s} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_n \end{pmatrix} = s_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} + v_0 \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_n \end{pmatrix} + \frac{1}{2} a \begin{pmatrix} t_1^2 \\ t_2^2 \\ \vdots \\ t_n^2 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Dies lässt sich wie folgt umschreiben:

$$\hat{s} = \boldsymbol{\tau} \begin{pmatrix} s_0 \\ v_0 \\ \frac{1}{2} a \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

mit

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 \\ 1 & t_2 & t_2^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_n & t_n^2 \end{pmatrix}$$

Nach einer bisher unveröffentlichten Arbeit von Laurence [8] ergibt sich nun für den Fehler  $S(a)$  der Beschleunigung, wobei  $S$  definiert ist als die Summe der Residuenquadrate beim besten Fit der Bewegungsgleichung 2.10. (Herleitung siehe Meyer [9])

$$\frac{S(a)}{a} = 2 \frac{\hat{\sigma}}{a} \sqrt{(\boldsymbol{\tau}^T \boldsymbol{\tau})_{3,3}^{-1}} \quad (2.11)$$

mit  $\hat{\sigma} = \sigma_x \sqrt{(n-1)/(n-3)}$  und  $d = a \frac{\Delta t^2}{2}$  die zurückgelegte Distanz, wobei  $\Delta t = t_i - t_1$  und  $\sigma_x$  der Fehler in der Verschiebung des Objektes ist.  $n$  sind die Anzahl der Messwerte. Setzt man diese Zusammenhänge in die obige Gleichung

ein, so gilt:

$$\frac{S(a)}{a} = \sqrt{\frac{n-1}{n-3}} \frac{\sigma_x}{d} \left[ \Delta t^2 \sqrt{(\tau^T \tau)^{-1}_{3,3}} \right] \quad (2.12)$$

Dabei handelt es sich bei  $(\tau^T \tau)^{-1}_{3,3}$  um das Inverse einer  $3 \times 3$  Matrix, von der das 3. Diagonalelement benutzt wird. Nach der Berechnung desselben ergibt sich:

$$\frac{S(a)}{a} = \frac{\sigma_x}{d} \sqrt{\frac{180(n-1)^4}{n(n-3)(n-2)(n+1)(n+2)}} \quad (2.13)$$

## 2.3 Die Funktionsweise der Bildverarbeitungssoftware zur Auswertung der Messdaten

Für das Programm zur Auswertung der Kugelbewegungen, welches von S. Laurence im Rahmen seiner Doktorarbeit zur Objektverfolgung entwickelt worden ist [7], wird die Programmiersprache “MATLAB” verwendet. Dieses beinhaltet eine Funktion namens “edge”, welche für die Kantendetektion zuständig ist. Diese Funktion benutzt den so genannten “Canny Edge Detector”. Die Software wird dafür eingesetzt, die Kanten der Kugel und anschließend ihre Position im Bild zu finden, diese Position soll mit der wahren Position im Experiment übereinstimmen.

### 2.3.1 Der Canny Edge Detector

Der Informatiker John F. Canny hat im Jahr 1986 den “Canny Edge Detector” [2] entwickelt. Seine drei Grundkriterien berufen sich auf:

- Eine niedrige Fehlerrate: möglichst alle Kanten finden.
- Gut lokalisierte Kanten: der Abstand zwischen der gefundenen Kante und der wirklichen Kante sollte minimal sein.
- Eine einzige Detektorantwort pro Kante: der Detektor soll nur einen Punkt pro Kantenpunkt zurückgeben, d.h. nicht mehrere Kanten identifizieren, wo nur eine ist.

Canny entwickelte daraus einen vierstufigen Algorithmus, der genau das erfüllt:

1. Glättung des Bildes mit einem Filter basierend auf der ersten Ableitung der Gaussfunktion: So soll zunächst das Rauschen reduziert und alle Kanten gefunden werden.
2. Man bestimmt die Intensitätsgradienten  $g_x$  in x- und  $g_y$  in y-Richtung, indem Gradientenoperatoren (z.B. Sobel, Roberts etc.) verwendet werden. Zuerst wird der Betrag  $M(x, y) = \sqrt{g_x^2 + g_y^2}$  jedes Pixels berechnet. Um nun die Richtung der Kante zu bestimmen, berechnet man den Winkel  $\alpha = \arctan\left(\frac{g_x}{g_y}\right)$ . Ein Pixel hat genau acht Nachbarn, das heißt nur die Werte  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $135^\circ$  sind möglich ( $0^\circ$  sind “unten” wenn man sich einen Kreis vorstellt).  $\alpha$  wird also auf den Wert gerundet, der einer der vier Richtungen am nächsten ist.
3. Der nächste Schritt nennt sich “Non-maximum suppression”. Da jede Kante nicht breiter als ein Pixel sein soll, sollen bloß die Maxima entlang der Kante übrig bleiben. Dazu wird der Betrag jedes Pixels mit dem seiner acht Nachbarn verglichen, kein Pixel darf eine höhere Intensität haben, außer denen, welche in der ausgewiesenen Kantenrichtung liegen. Die Grauwerte der anderen Nachbarpixel werden dann gleich Null gesetzt.
4. Der letzte Punkt ist das so genannte “Hysteresis thresholding”. Dabei handelt es sich um ein Ausschlusskriterium, ab wann ein Pixel zu einer Kante gehört. Man setzt sowohl eine hohe  $T_H$  und eine niedrige Grenze  $T_N$  (Threshold), Canny empfiehlt das Verhältnis von der hohen zur niedrigen Grenze auf zwei oder drei zu eins zu legen. Zunächst durchsucht man das Bild nach einem Pixel, welches einen höheren Wert als  $T_H$  hat, dieser Kante folgt man zu beiden Seiten und alle Pixel, welche eine höhere Intensität als  $T_N$  haben, werden als Kante markiert. Alle anderen Pixel werden gleich Null gesetzt.

Weiterführende Informationen zum Canny-Edge-Detector können in [4, 20] gefunden werden.

### 2.3.2 Subpixelkantenroutine

Diese Arbeit hat zum Ziel, Objekte möglichst genau zu verfolgen. Demnach genügt es nicht, die Kantenposition auf einen Pixel genau zu bestimmen. Für die mit dem Canny-Filter extrahierten Punkte soll eine genauere Position ermittelt werden. Dazu wird in der lokalen Nachbarschaft dieser Punkte wieder auf die Gradienten

aus Schritt 2 des Canny-Operators zurückgegriffen. Das Maximum dieser Gradienten ist im Normalfall schon die Kante. Als weiterer Schritt wird eine quadratische Polynomfunktion an diese gefittet und das Maximum dieser Funktion als das Intensitätsmaximum der Kante definiert. Der Unterschied  $\delta x$  zwischen den Maxima wird im Bild auf die Kantenposition in die jeweilige Richtung hinaufaddiert [15]. Als Beispiel: Die Kante wird bei Pixel 100 in horizontaler x-Richtung (Winkel  $90^\circ$ ) detektiert, wenn  $\delta x = 0,2$  zwischen den beiden Maxima ist, dann liegt die Kante nicht bei Pixel 100, sondern bei Pixel 100,2. In **Abbildung 2.4** ist die Approximation der ersten Ableitung durch den quadratischen Fit der Polynomfunktion schematisch dargestellt.

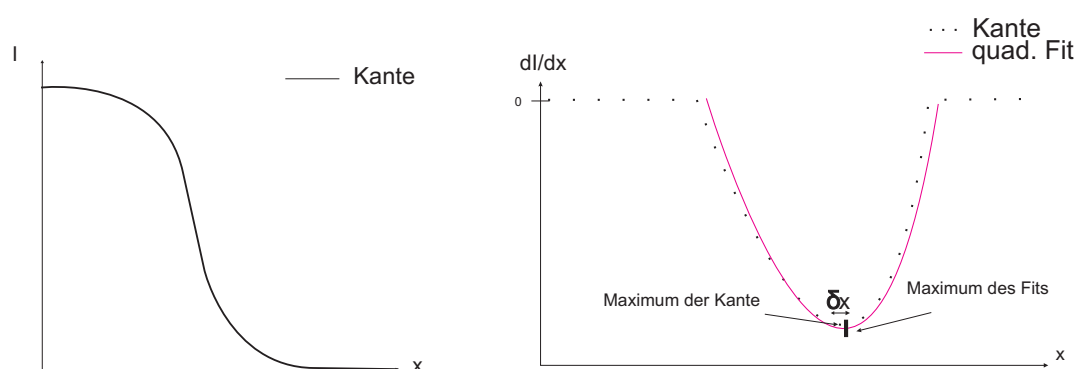


Abb. 2.4: Schematische Erklärung der Subpixelkantendetektion - Links: Intensitätsdarstellung einer Kante, Rechts: Ableitung der Kante und Approximation

### 2.3.3 Objektdetektion

Da nun die Kantenpunkte der Kugel (bzw. des Kreises in 2D) im Bild gefunden sind, müssen aus den Koordinaten der Kanten die Koordinaten des Mittelpunktes und der Radius bestimmt werden. Da die Kreisgleichung

$$r_0^2 = (\hat{x} - x_0)^2 + (\hat{y} - y_0)^2 \quad (2.14)$$

eine nichtlineare Gleichung ist, muss sie auf eine Form wie Gleichung 2.9 zurückgeführt werden. Dies erfolgt mithilfe einer Substitution ( $\hat{x}$  und  $\hat{y}$  sind Vektoren):

$$\hat{x}^2 - 2\hat{x}x_0 + x_0^2 + \hat{y}^2 - 2\hat{y}y_0 + y_0^2 = r_0^2 \quad (2.15)$$

$$(\hat{x}^2 + \hat{y}^2) = (r_0^2 - x_0^2 - y_0^2) + (2x_0)\hat{x} + (2y_0)\hat{y} \quad (2.16)$$

## *2 Theoretische Grundlagen*

Dieses überbestimmte Gleichungssystem kann nun, z.B mit dem Newton-Iterationsverfahren, gelöst werden.

# 3 Kamerakalibrierung

## 3.1 Versuchsaufbau und Durchführung

In diesem Kapitel werden die Experimente zur Bestimmung der charakteristischen Parameter des CCD-Chips der HPV-1 Kamera erläutert. Alle nachfolgenden Messungen werden bei einer Kamertemperatur von  $T = 19^{\circ}\text{C}$  aufgenommen.

Abbildung 3.1 verdeutlicht den Aufbau der Kamerakalibrierung.

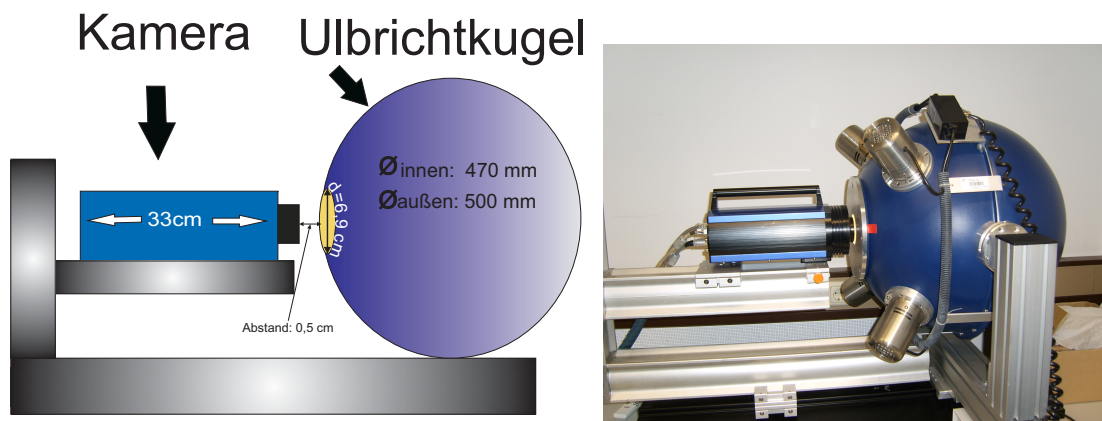


Abb. 3.1: Aufbau der Kamerakalibrierung (schematisch und Foto)

Zunächst werden das thermische Rauschen/der Dunkelstrom und zugehörige Parameter wie Hotpixel und Fixmuster-Rauschen quantifiziert. Dazu werden mehrere Bildsequenzen bei geschlossenem Objektiv bei verschiedenen Belichtungszeiten und Verstärkungsfaktoren aufgenommen. Um anschließend das Ansprechverhalten des Chips bei Helligkeit zu überprüfen, werden zwei Messungen mit der Ulbrichtkugel durchgeführt:

Bei der ersten Messung werden die Bildsequenzen bei voller Lichtstärke der Ulbrichtkugel (16V,  $L = 1800\text{ lx}$ ) aufgenommen.

Bei der zweiten Messung wird sowohl mit als auch ohne Objektiv gemessen. Hierbei wird die Helligkeit der Kugel so eingestellt, dass der Chip gerade nicht gesättigt ist.

## 3.2 Ergebnisse der Kamerakalibrierung

### 3.2.1 Dunkelstrom

Zur Auswertung wird ein Programm benutzt, welches den Grauwert des Pixels von 0 bis 1023 ausliest, diesen über alle Pixel des Bildes mittelt und die Standardabweichung bestimmt. Anschließend wird über die gesamten Bildsequenz der gewichtete Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt, sodass der Dunkelstrom in Abhängigkeit von der Belichtungszeit und vom Verstärkungsfaktor aufgetragen werden kann.

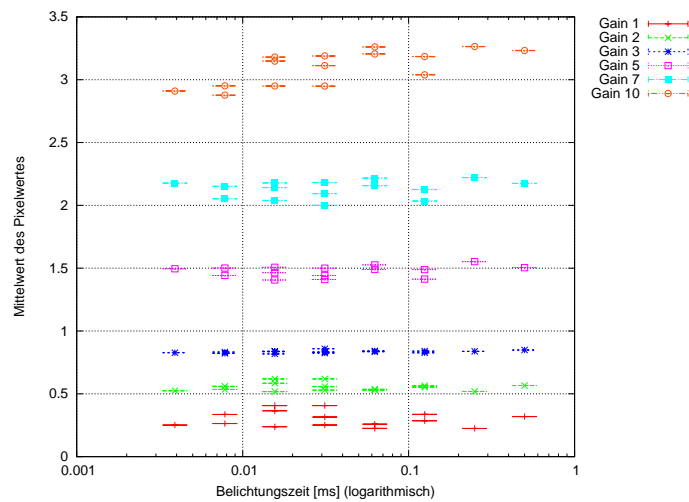


Abb. 3.2: Dunkelstrom in Abhängigkeit von der Belichtungszeit und vom Verstärkungsfaktor

Gemessen wurde der Dunkelstrom für die Frequenzen  $f = 1; 4; 8; 16; 32$  kfps, die Belichtungsfaktoren  $1/2$ ,  $1/4$  und  $1/8$ , sowie die Verstärkungsfaktoren  $1; 2; 3; 5; 7$  und  $10$ . Die Belichtungszeiten werden nach **Formel 2.2** berechnet.

In **Abbildung 3.2** ist der gemessene Dunkelstrom für die Belichtungszeiten und Verstärkungsfaktoren aufgetragen. Zu erkennen ist, dass sich der Dunkelstrom bei Erhöhung der Belichtungszeit nicht ändert, wohl aber bei Erhöhung des Verstärkungsfaktors. Bildet man den gewichteten Mittelwert über die Dunkelströme pro Verstärkungsfaktor, stellt man fest, dass diese ziemlich genau um den Faktor des Verstärkungsfaktors größer sind. Der Verstärkungsfaktor und der Dunkelstrom sind also proportional. In **Tabelle 3.1** werden die Dunkelströme für die einzelnen Verstärkungsfaktoren aufgeführt.



VF	Intensität
1	$0,283 \pm 0,015$
2	$0,550 \pm 0,008$
3	$0,834 \pm 0,003$
5	$1,476 \pm 0,011$
7	$2,129 \pm 0,018$
10	$3,095 \pm 0,035$

Tab. 3.1: Gewichtete Mittelwerte der Dunkelwerte bei verschiedenen Verstärkungsfaktoren

Daraus lässt sich erkennen, dass ein Grauwert von 3 bei Verstärkungsfaktor 10 in einem Bereich bis 1023 gerade einmal 0,3% des Gesamtwertes ausmacht. Der Dunkelstrom der Kamera ist also zu vernachlässigen. Dennoch wird der Grauwert der Dunkelstrommessung bei jeder Belichtungszeit und bei jedem Verstärkungsfaktor von den Intensitätswerten der nachfolgenden Helligkeitsmessungen abgezogen, um möglichst genaue Aussagen treffen zu können.

## Hotpixel

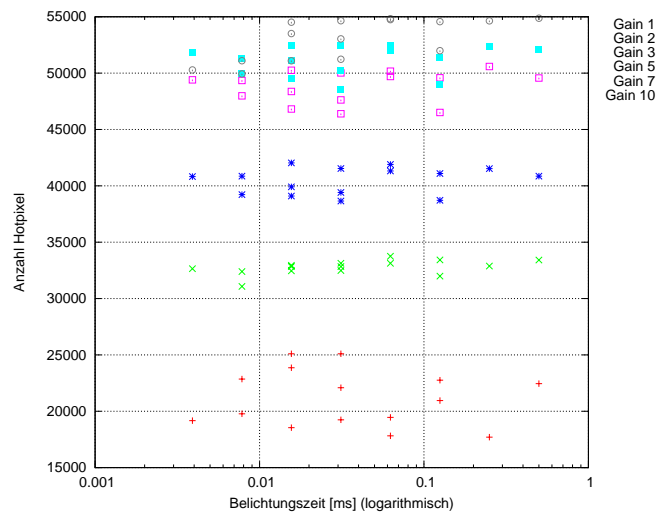


Abb. 3.3: Anzahl der Hotpixel bei der HPV-1 Kamera in Abhängigkeit vom Verstärkungsfaktor

In der Theorie wurde bereits ein Pixel als ein Hotpixel definiert (vgl. **Abschnitt**

**2.1.1**), dessen Grauwert drei Standardabweichungen oberhalb des Gesamtmittelwertes aller Pixel des Bildes liegt. In **Abbildung 3.3** ist die Anzahl der Hotpixel in Abhängigkeit von der Belichtungszeit aufgetragen. In **Tabelle 2.1** wurden die Charakteristika der Kamera aufgeführt, insgesamt hat die Kamera  $312 \times 260 = 81120$  Pixel. Das bedeutet, dass bereits ab Verstärkungsfaktor 3 mehr als die Hälfte aller Pixel “hot” sind. Da die Hotpixel mit dem Dunkelstrom zusammen aufgenommen wurden, ist diese Störung nicht relevant.

#### Fixmuster-Rauschen

Nach **Formel 2.1** wurde das Fixmuster-Rauschen bestimmt und in **Abbildung 3.4** aufgetragen.

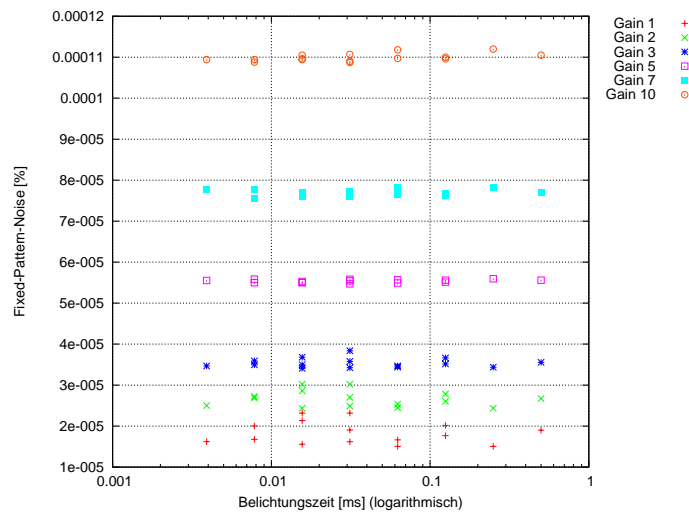


Abb. 3.4: Prozentualer Anteil des Fixmuster-Rauschens abhängig vom Verstärkungsfaktor und von der Belichtungszeit

Das Rauschen zeigt auch hier eine Unabhängigkeit von der Belichtungszeit, steigt wie zu erwarten aber wieder mit dem Verstärkungsfaktor an. Das Rauschen ist aber so gering, dass es für die weitere Betrachtung ignoriert werden kann (vgl. [19]).

Festzuhalten sind folgende Ergebnisse: Der Dunkelstrom und damit auch die Hotpixel sowie das Fixmuster-Rauschen steigen mit der Verstärkung an. Der Dunkelstrom ist sogar direkt proportional zum Verstärkungsfaktor. Die Intensitätswerte sind bei der Dunkelstrombestimmung unabhängig von der Belichtungszeit.

### 3.2.2 Helligkeitsabhängigkeit

#### Maximale Beleuchtung des Chips

Bei dieser Messung werden, genau wie bei der Dunkelstrombestimmung, die Belichtungszeiten und die Verstärkungsfaktoren variiert. Der Chip wird bei voller Beleuchtung der Ulbrichtkugel direkt beleuchtet (ohne Optik), da die Charakteristik des Chips dargelegt werden soll. Bei den Messdaten wurden die Dunkelwerte bereits abgezogen. Gemessen wurden ebenfalls die Frequenzen  $f = 1; 4; 8; 16; 32$  kfps, die Belichtungsfaktoren  $1/2; 1/4$  und  $1/8$  sowie die Verstärkungsfaktoren  $1; 2; 3; 5; 7$  und  $10$ . In **Abbildung 3.5** sind die Grauwerte, gemittelt über die gesamte Bildsequenz, über die Belichtungszeit für verschieden Verstärkungsfaktoren aufgetragen.

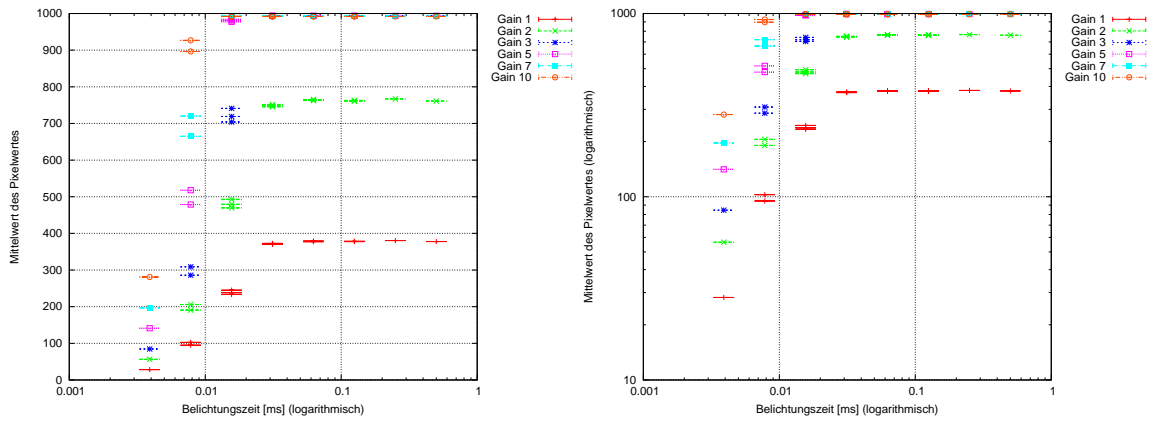


Abb. 3.5: Helligkeitslinearitätsbestimmung: Intensitätswerte bei verschiedenen Verstärkungen aufgetragen über der Belichtungszeit bei maximaler Beleuchtung

Es lässt sich erkennen, dass der Chip sehr schnell gesättigt wird, jedoch nicht erst bei einem Grauwert von 1023, wie eigentlich erwartet sondern schon bei 400 bei Verstärkungsfaktor 1. Bei Verstärkungsfaktor 2 ist der Chip bei einem Intensitätswert von 760 gesättigt, der Maximalwert bei allen anderen Verstärkungsfaktoren beträgt 995.

Die doppeltlogarithmische Auftragung dient dazu, den Abknickpunkt zur Sättigung genauer zu identifizieren. Der Bereich vor der Sättigung scheint linear zu sein, daher werden die Werte mit einer linearen Funktion

$$I_{VF}(t_B) = b + m \cdot t_B \quad (3.1)$$

approximiert, die Ergebnisse sind die folgenden ( $t$  in [ms]):

$$\begin{aligned}
I_1(t_B) &= (-12,7221 \pm 10,16) + (12676 \pm 669,1) \cdot t_B \\
I_2(t_B) &= (-26,8932 \pm 20,23) + (25552,1 \pm 1338) \cdot t_B \\
I_3(t_B) &= (-127,777 \pm 6,923) + (54336,9 \pm 987,9) \cdot t_B \\
I_5(t_B) &= (-121,962 \pm 26,46) + (70868,5 \pm 2156) \cdot t_B \\
I_7(t_B) &= (-297,747 \pm 41,21) + (126553 \pm 8054) \cdot t_B \\
I_{10}(t_B) &= (-352,162 \pm 29,78) + (162064 \pm 5061) \cdot t_B
\end{aligned}$$

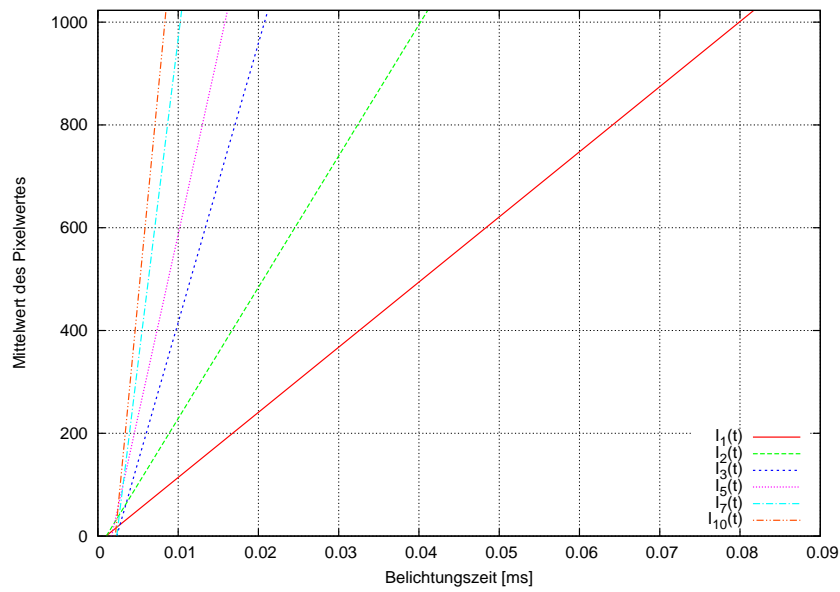


Abb. 3.6: Lineare Approximation der Helligkeitsabhängigkeit des CCD-Chips für verschiedene Verstärkungsfaktoren in Abhängigkeit von der Belichtungszeit

In **Abbildung 3.6** sind die Geradengleichungen der Übersichtlichkeit halber ohne die Messwerte aufgetragen. Die Steigungen sollten genau um den Faktor größer sein, deren Verstärkungsfaktor sie auch darstellen. Bei doppelter Verstärkung sollte die Steigung demnach doppelt so hoch sein. Bei der doppelten Verstärkung stimmt dieses auch überein, bei den höheren Verstärkungen sind die Steigungen allerdings 10-30 % zu hoch. Der Fit hat aber auch nur für die niedrigeren Verstärkungen eine ausreichende Güte, denn standen für die Approximation ab Verstärkungsfaktor 3 nur noch sechs Werte für den Fit zur Verfügung, während es bei Verstärkungsfaktor

1 und 2 noch neun Werte waren. Bei Verstärkungsfaktor 7 und 10 waren es nur noch drei Werte, da der Chip dann bereits gesättigt war.

### Genauere Untersuchung des Bereichs vor der Sättigung

Um genauere Aussagen über das Helligkeitsverhalten des Chips machen zu können, wird die Ulbrichtkugel so eingestellt, dass der maximale Intensitätswert bei der höchsten Belichtungszeit beim höchsten zu messenden Verstärkungsfaktor ungefähr 800 beträgt; der Chip also gerade noch nicht gesättigt ist. Diese Messung wird sowohl mit als auch ohne Optik durchgeführt, um zu überprüfen ob Unterschiede bestehen. Dazu befindet sich die Kamera bei der Messung ohne Objektiv 1,7 cm vor der Öffnung der Ulbrichtkugel, diese wird auf 5,25 V eingestellt ( $L = 20,6 \text{ lx}$  am Ort der Kamera). Für die Messung mit Objektiv befindet sich die Kamera 13,4 cm vor der Kugel, diese wird auf 7,7 V eingestellt ( $L = 9,9 \text{ lx}$  am Ort der Kamera) um ebenfalls ein Intensitätsmaximum von ca. 800 zu erreichen.

Da bei den vorherigen Messungen durch Kombinationen der Frequenzen und Belichtungsfaktoren einige Belichtungszeiten mehrfach auftraten, werden bei dieser Messung die folgenden Frequenzen für die Verstärkungsfaktoren 1; 3 und 5 gemessen:  $f = 1; 4; 8; 16; 32 \text{ kfps}$  und so mit den möglichen Belichtungsfaktoren  $1/2, 1/4, 1/8$  kombiniert, dass keine Belichtungszeit doppelt auftritt. In **Abbildung 3.7** sind die Ergebnisse graphisch dargestellt. Der maximale Intensitätswert ohne Objektiv beträgt 863,9, der Maximalwert mit Objektiv beträgt 858,1.

Festzuhalten ist, dass eine lineare Approximation hier nicht mehr sinnvoll ist. Doch bevor die Messwerte durch eine andere Funktion approximiert werden, werden sie normiert, um sie besser vergleichen zu können. Das heißt, der maximale Intensitätswert bei jedem Verstärkungsfaktor wird auf den Wert 1 normiert. Dann sollten alle Kurven direkt aufeinander liegen, da die Verstärkung dadurch eliminiert wurde. Lügen sie nicht aufeinander, wäre die interne Verstärkung der Kamera nicht in Ordnung. Diese Werte werden schließlich gefittet.

In **Abbildung 3.8** sind die normierten Werte und die Regressionsfunktionen aufgetragen. Eine kubische Funktion

$$I_{VF}(t_B) = a \cdot t_B^3 + b \cdot t_B^2 + c \cdot t_B + d \quad (3.2)$$

approximiert die Werte am besten.

Folgende Ergebnisse der Fits lassen sich festhalten:

### 3 Kamerakalibrierung

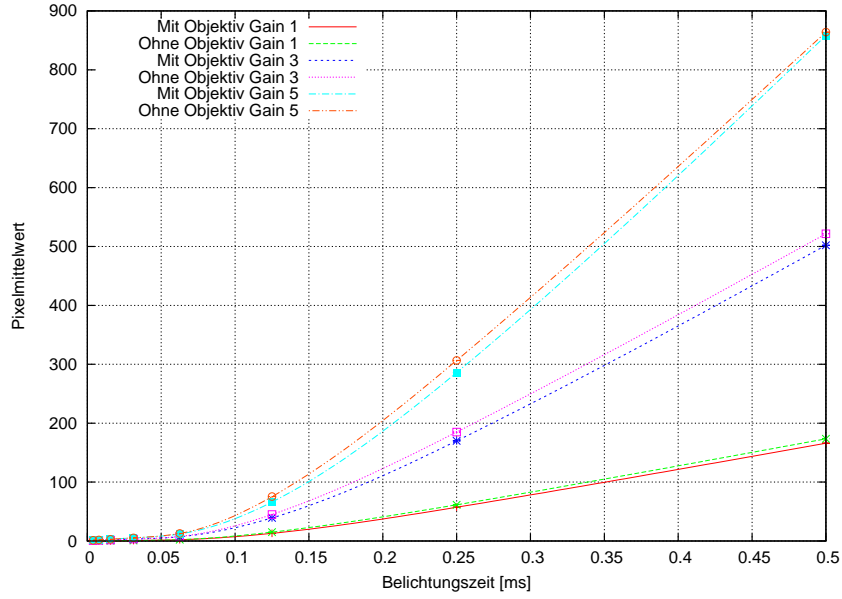


Abb. 3.7: Helligkeitsverhalten des Chips im mittleren Dynamikbereich: Intensitätswerte bei verschiedenen Verstärkungen aufgetragen über der Belichtungszeit mit und ohne Optik (Messwerte durch Splines verbunden)

Ohne Objektiv:

$$\begin{aligned}
 I_1(t_B) &= (-8,055 \pm 1,946)t_B^3 + (8,656 \pm 1,061)t_B^2 \\
 &\quad + (-0,3094 \pm 0,0888)t_B + (0,00223 \pm 0,00134) \\
 I_3(t_B) &= (-5,790 \pm 3,013)t_B^3 + (7,365 \pm 1,591)t_B^2 \\
 &\quad + (-0,2094 \pm 0,1154)t_B + (0,00204 \pm 0,00161) \\
 I_5(t_B) &= (-5,365 \pm 3,208)t_B^3 + (7,121 \pm 1,695)t_B^2 \\
 &\quad + (-0,19 \pm 0,12)t_B + (0,00199 \pm 0,00165)
 \end{aligned}$$

Mit Objektiv:

$$\begin{aligned}
 I_1(t_B) &= (-7,075 \pm 1,704)t_B^3 + (8,1314 \pm 0,9417)t_B^2 \\
 &\quad + (-0,2898 \pm 0,0838)t_B + (0,0023 \pm 0,0014) \\
 I_3(t_B) &= (-5,461 \pm 2,385)t_B^3 + (7,206 \pm 1,284)t_B^2 \\
 &\quad + (-0,2216 \pm 0,1027)t_B + (0,0023 \pm 0,0016) \\
 I_5(t_B) &= (-4,870 \pm 2,475)t_B^3 + (6,882 \pm 1,327)t_B^2 \\
 &\quad + (-0,2083 \pm 0,1044)t_B + (0,0023 \pm 0,0017)
 \end{aligned}$$

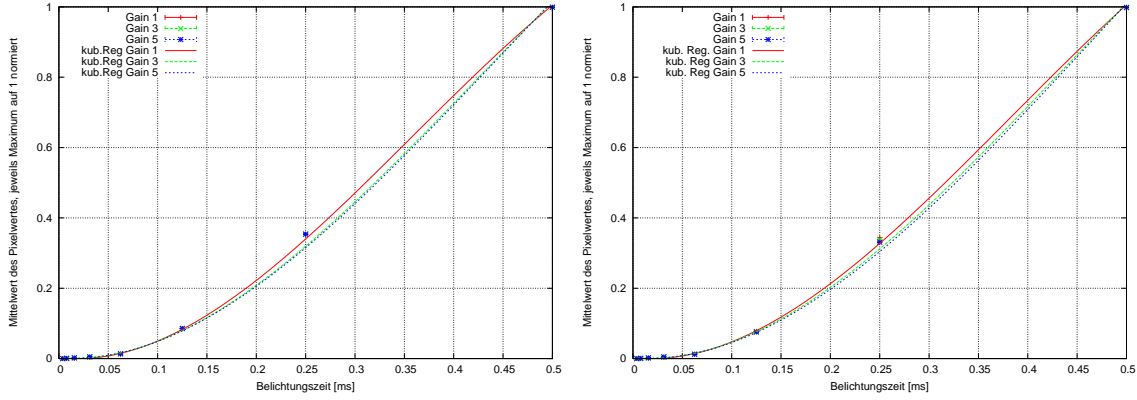


Abb. 3.8: Kubische Approximation der normierten Intensitätswerte bei verschiedenen Verstärkungen in Abhängigkeit von der Belichtungszeit - Links mit und rechts ohne Objektiv

Die Funktionen liegen wie erwartet alle im selben Bereich, wie an den Werten in **Abbildung 3.8** bereits zu erkennen war. Daher genügt es, alle drei Verstärkungen mit einer einzigen Funktion zu approximieren, da die Werte so nah aneinander liegen, dass man sie kaum noch unterscheiden kann. Ebenfalls gibt es kaum einen Unterschied im Verhalten, ob ein Objektiv benutzt wird oder nicht. Mit Objektiv ist die Intensität ein wenig geringer. Im Folgenden werden die Indizes O für “mit Objektiv” und C für “nur Chip” benutzt.

$$\begin{aligned}
 I_C(t_B) &= (-6,183 \pm 1,309)t_B^3 + (7,580 \pm 0,695)t_B^2 \\
 &\quad + (-0,2235 \pm 0,0515)t_B + (0,002103 \pm 0,000731) \\
 I_O(t_B) &= (-5,688 \pm 1,034)t_B^3 + (7,340 \pm 0,559)t_B^2 \\
 &\quad + (-0,2342 \pm 0,0456)t_B + (0,002314 \pm 0,000729)
 \end{aligned}$$

Diese Funktionen sind charakteristisch für die benutzte Kamera. Sie geben im gemessenen Dynamikbereich für jede gewünschte Belichtungszeit bis 0,5 ms unabhängig von der Verstärkung und der Lichtstärke die prozentuale Intensität des Bildes an, die in die gewünschte Bitzahl um- und auf den Verstärkungsfaktor hochgerechnet werden kann.

### 3.2.3 Spezielle Probleme der HPV-1 Kamera

Während der Auswertung des Helligkeitsverhalten des Chips fiel auf, dass nicht jedes Bild gleichmäßig belichtet wird, sondern jedes zwölfte Bild ein Offset hat. Das

### 3 Kamerakalibrierung

heißt, in jeder aufgenommenen Bildsequenz bei jeder Frequenz, jedem Verstärkungsfaktor, hat das erste, das dreizehnte usw. Bild (bzw. das nullte, zwölfte, 24., usw.) eine niedrigere Intensität als alle anderen Bilder. In **Abbildung 3.9** ist eine Bildsequenz aus der zweiten Helligkeitsmessung ohne Objektiv aufgetragen. Dort lässt sich der beschriebene Zusammenhang sehr gut erkennen. Da diese starken Intensitäts-

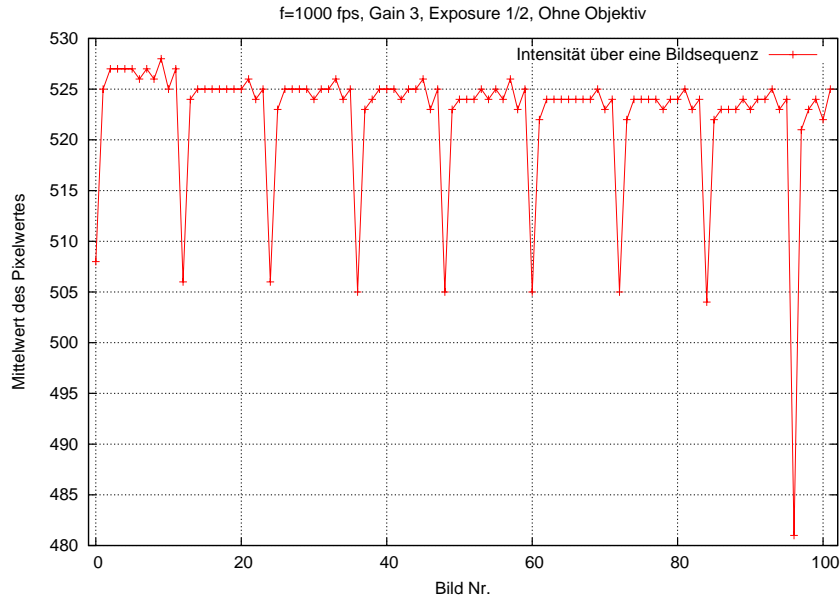


Abb. 3.9: Intensität über eine Bildserie

schwankungen zu Problemen in der Kantendetektion führen können, ist es sicherer, die falsch belichteten Bilder zu entfernen, als diese mit einer Bildverarbeitungssoftware aus den Nachbarbildern zu interpolieren. Zudem bei den Bewegungsaufnahmen die Interpolation aus den Nachbarbildern generell ausfällt, da es gerade dabei um die Verschiebung des Objektes zwischen den einzelnen Bildern ankommt und eine Interpolation die Ergebnisse verfälschen würde.

Der Kontakt mit der Herstellerfirma ergab, dass das Problem bereits bekannt ist. Es handelt sich nicht um einen Anwendungs bzw. Anwenderfehler sondern um eine Hardwareeigenschaft. Die Bilder des CCD-Chips werden immer in Bildserien von 12 Bildern ausgelesen. Während der Verschiebung der Bildserie zum Ausleseverstärker und der Umschaltung auf die nächste Bildserie von 12 Bildern bleibt das letzte Bild der Bildserie länger im Speicher als die anderen 11, daher geht die Ladung auf dem Chip und somit ein Teil der Belichtung des Bildes verloren [14].



## 4 Statische Messung

Diese Messung wird in zwei Teile unterteilt. Zunächst wird die Kugel um eine gewisse geometrische Distanz verschoben, um festzustellen, wie der Fehler der Positionsverschiebung in Abhängigkeit von der Position ganz allgemein aussieht. Aufbauend darauf lassen sich das Pixelmuster und die Auflösung bestimmen, sodass um optische Distanzen, z.B um einen Pixel, verschoben werden kann.

### 4.1 Kugelverschiebungen um geometrische Distanzen

#### 4.1.1 Versuchsaufbau und Durchführung

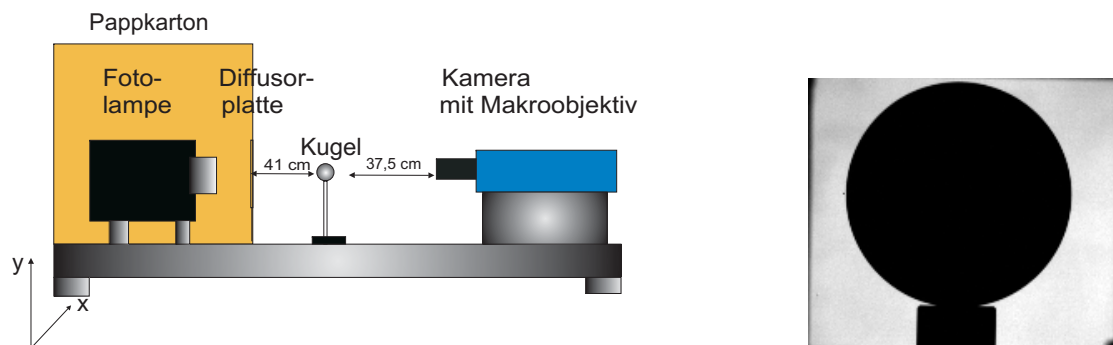


Abb. 4.1: Versuchsaufbau für die statische Messung (links) und Bild der Kugel aus der Kameraperspektive (rechts)

Um die Genauigkeit des Auswerteverfahrens bezogen auf die Positionsbestimmung zu ermitteln, wird zunächst eine statische Messung durchgeführt. Das bedeutet, dass eine gesamte Bildsequenz von der ruhenden Kugel aufgenommen wird, bevor sie in x-Richtung verschoben wird.

Dabei liegt die Kugel (Durchmesser  $d = 40 \text{ mm}$ ) frei auf einem Stab, welcher durch einen elektrischen Versteller in  $\Delta x = 1 \text{ }\mu\text{m}$  Schritten bewegt werden kann. Es wurden ebenfalls Messungen mit einem manuell zu bedienenden Mikrometertisch in

$\Delta x = 10 \mu\text{m}$  Schritten durchgeführt. Allerdings war dort der Gerätefehler mit  $\sigma_x < 1 \mu\text{m}$  angegeben, der wirkliche Fehler beim Verstellen schien aber höher zu sein. Um diesen Fehler auszuschließen, wurden die folgenden Messungen komplett mit der elektrischen Variante durchgeführt, welche auch einen Hystereseaussgleich besitzt. Es soll schließlich der kleinste Fehler bestimmt werden, welcher aufgrund des CCD-Chips und des Auswerteverfahrens nicht zu umgehen ist.

Die Kugel befindet sich bei der Messung vor der Diffusorplatte, welche von hinten von einer Halogenlampe angestrahlt wird. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass die Kugel so weit von der Diffusorplatte weg geschoben wird, bis keine Reflexionen mehr auf ihrer Oberfläche zu erkennen sind.

Die Intensität der Lichtquelle lässt sich über einen zwischengeschalteten Stelltrafo regeln. Gemessen wird zunächst bei einer Lichtstärke von  $L = 174\text{lx}$ , was hier in der ersten Messung 100% Lichtstärke entspricht und einer Lichtstärke von  $L = 88,3\text{lx}$ , was 50% entspricht (alle Lichtstärken werden am Ort der Kugel gemessen).

Bei jeder Messung wird die Kugel um  $\Delta x = 1; 10$  bzw.  $100 \mu\text{m}$  in x-Richtung verschoben, insgesamt um  $1000 \mu\text{m}$ . Diese Einteilung dient zum Einen dazu, einen großen Messbereich abzudecken, zum Anderen um genügend Werte für eine ausreichende Statistik zur Verfügung zu haben. Eine Skizze des Versuchsaufbaus und ein aufgenommenes Bild der Kugel der HPV-1 Kamera befinden sich in **Abbildung 4.1**.

Die Kameraeinstellungen sind:  $f = 1000\text{fps}$ , Verstärkungsfaktor 15 und Belichtungsfaktor  $1/2$ . Auch hier werden alle Messungen bei einer Kühlung der Kamera auf  $T = 19^\circ\text{C}$  vorgenommen.

### 4.1.2 Ergebnisse

In **Abbildung 4.2** sind die absoluten und die relativen Fehler der Positionsbestimmung für die Messung bei  $L = 174\text{lx}$  graphisch aufgetragen. Wie zu erwarten wird der relative Fehler zu großen Verschiebungen hin immer kleiner und nähert sich Null an ( $\sim 0.2\%$  bei einer Verschiebung um  $\Delta x = 1000 \mu\text{m}$ ). Die absolute Abweichung hingegen ist über die gesamte Messung hinweg konstant in einem Bereich von  $+2 \mu\text{m}$  bis  $-6 \mu\text{m}$ .

Die Ergebnisse für die Messung bei nur 50% Lichtstärke sind in **Abbildung 4.3** aufgetragen. Wie zu erwarten sind die absoluten Fehler bei nur der halben Lichtstärke größer. Der Kontrast ist schwächer, das heißt, dass die Kantendetektion nicht mehr so genau das Maximum der Kante erkennen kann, da diese verschmiert ist.

## 4.1 Kugerverschiebungen um geometrische Distanzen

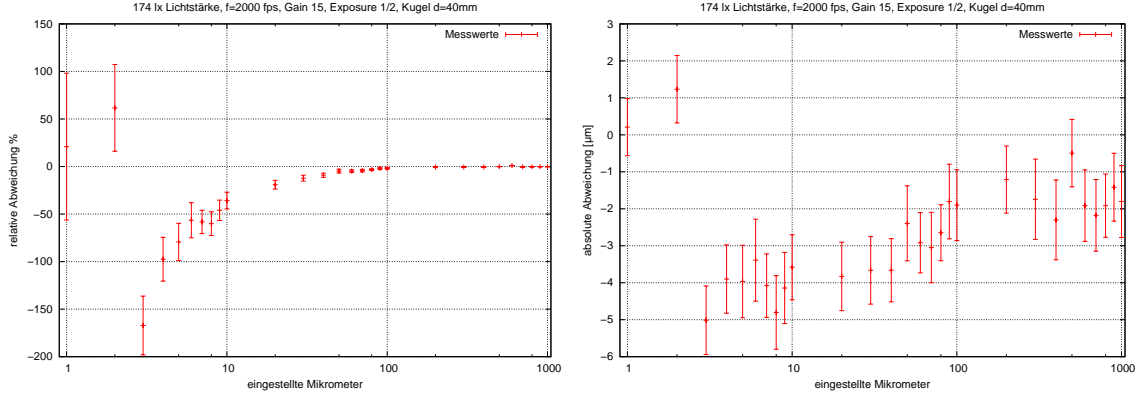


Abb. 4.2: x-Verschiebung innerhalb eines Millimeters - relative und absolute x-Abweichung bei 100% Lichtstärke

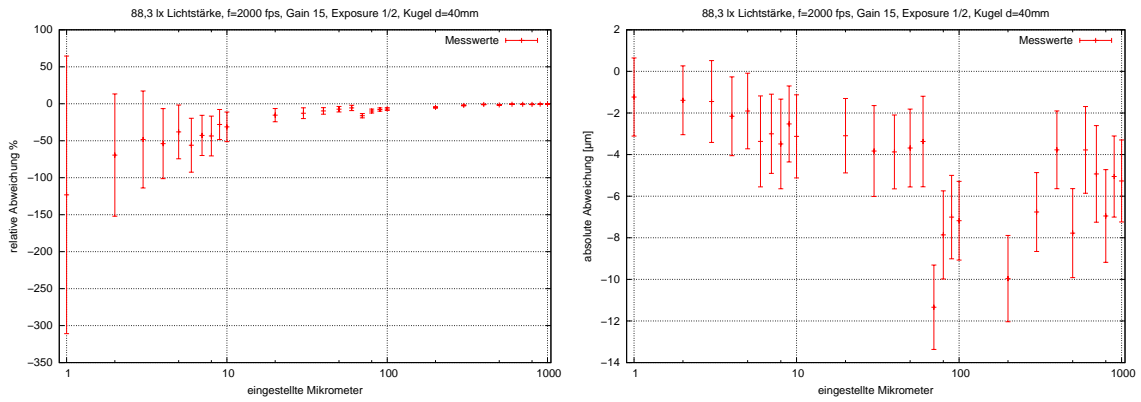


Abb. 4.3: x-Verschiebung innerhalb eines Millimeters - relative und absolute x-Abweichung bei 50% Lichtstärke

Der absolute Fehler bewegt sich in einem Bereich von  $+2\mu\text{m}$  bis  $-14\mu\text{m}$ . Auch bei geringerer Lichtstärke nähert sich der relative Fehler im Unendlichen vermutlich dem Wert Null an. Hier liegt dieser bei  $\sim 0.5\%$  nach  $\Delta x = 1000\mu\text{m}$ .

Die Form der absoluten Fehler lassen eine leichte Schwebung erahnen, was bedeuten könnte, dass der absolute Fehler ein Minimum erreicht, sobald die eingestellte Distanz einem Pixel entspricht.

Aus dem gemessenen Radius in Pixeln lässt sich die Auflösung bestimmen, da der physikalische Radius der Kugel bekannt ist. Der gemessene Radius in Pixeln beträgt bei diesem Experiment:  $r_{gem} = (66,934 \pm 0,003)$  Pixel bei 100% Lichtstärke bzw.  $r_{gem} = (66,948 \pm 0,015)$  Pixel bei 50% Lichtstärke. Mit dem physikalischen Radius  $r_{phys} = 20\text{ mm}$  ergibt sich eine Auflösung von:  $S = (298,8 \pm 0,9)\mu\text{m}/\text{px.}$  bzw.  $S = (298,74 \pm 4,32)\mu\text{m}/\text{px.}$  Die viel höhere Standardabweichung bei der geringeren

Lichtstärke ergibt sich aus dem Aspekt heraus, dass bei niedrigerem Kontrast die Kantendetektion ungenauer wird.

Ein Pixel deckt also einen Bereich von ca.  $300\text{ }\mu\text{m}$  ab.

## 4.2 Kugelverschiebungen um optische Distanzen

### 4.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Um die Annahme zu überprüfen, ob der Fehler abhängig von der Verschiebung innerhalb der Pixel ist, wird nun die Verschiebung der Kugel innerhalb eines Pixels gemessen. Es gibt die Vermutung, dass die bereits erwähnte Schwebung durch die Kantendetektion und Subpixelroutine zustande kommt. Dies soll an dieser Stelle genauer untersucht werden.

Man kennt aus der vorhergehenden Messung die Auflösung von  $300\text{ }\mu\text{m}/\text{px}$ .

#### Grobe Messung

Um eine ungefähre Ahnung davon zu bekommen, wie sich der Fehler innerhalb eines Pixels verhält, wird zunächst mit der  $d = 40\text{ mm}$  Kugel von  $x = 0\text{ }\mu\text{m}$  bis  $x = 300\text{ }\mu\text{m}$  in  $\Delta x = 30\text{ }\mu\text{m}$  Schritten bei  $L = 174\text{ lx}$ ,  $f = 1000\text{ fps}$ , Verstärkungsfaktor 15 und Belichtungsfaktor  $1/2$  gemessen.

#### Messung unter optimalen Bedingungen

Um diese grobe Messung zu verfeinern, wird die Kugel von  $x = 0\text{ }\mu\text{m}$  bis  $x = 400\text{ }\mu\text{m}$  in  $\Delta x = 5\text{ }\mu\text{m}$  Schritten verschoben. Die Kameraeinstellungen hierbei sind nun:  $f = 2000\text{ fps}$ , Verstärkungsfaktor 5, Belichtungsfaktor  $1/2$ . Die Lichtstärke beträgt  $L = 680\text{ lx}$ , da statt der Halogenlampe jetzt eine Fotolampe mit höherer Lichtstärke verfügbar war. Diese Einstellungen werden ebenfalls bei den Fallexperimenten verwendet.

#### Messung unter optisch schlechteren Bedingungen

Dieselbe Messung wird noch einmal mit der kleineren Kugel ( $d = 30\text{ mm}$ ) durchgeführt, um festzustellen, ob und inwieweit die Positionsbestimmung ungenauer wird. Schließlich wird die Messung mit der großen Kugel ( $d = 40\text{ mm}$ ) mit denselben

Einstellungen, aber statt mit Verstärkungsfaktor 5 mit Verstärkungsfaktor 1 durchgeführt. Bei dieser Einstellung ist der Kontrast enorm schlechter. Hier soll überprüft werden, in welchem Maße die Genauigkeit der Positionsbestimmung abnimmt.

### Kontrollmessung mit einer festgeschraubter Kugel

Da die Kugel bei den anderen Messungen auf dem Stab nur aufliegt, ist es interessant herauszufinden, ob eine festgeschraubte Kugel noch genauere Ergebnisse liefert. Es handelt sich um Messungen im Mikrometerbereich. Hier besteht die Möglichkeit, dass wenn eine Person am Versuchsaufbau vorbeigeht oder durch Eigenschwingungen des Gebäudes sich eine nicht festgeschraubte Kugel um ein paar Mikrometer bewegt. Das würde die Messung bereits stören. Für die Messung wird eine Messingkugel ( $d = 39,9 \text{ mm}$ ) mit Gewinde verwendet, die Einstellungen hierbei sind  $f = 2000 \text{ fps}$ , Verstärkungsfaktor 5, Belichtungsfaktor  $1/2$ . Die Lichtstärke beträgt  $L = 680 \text{ lx}$ .

### 4.2.2 Ergebnisse

#### Grobe Messung

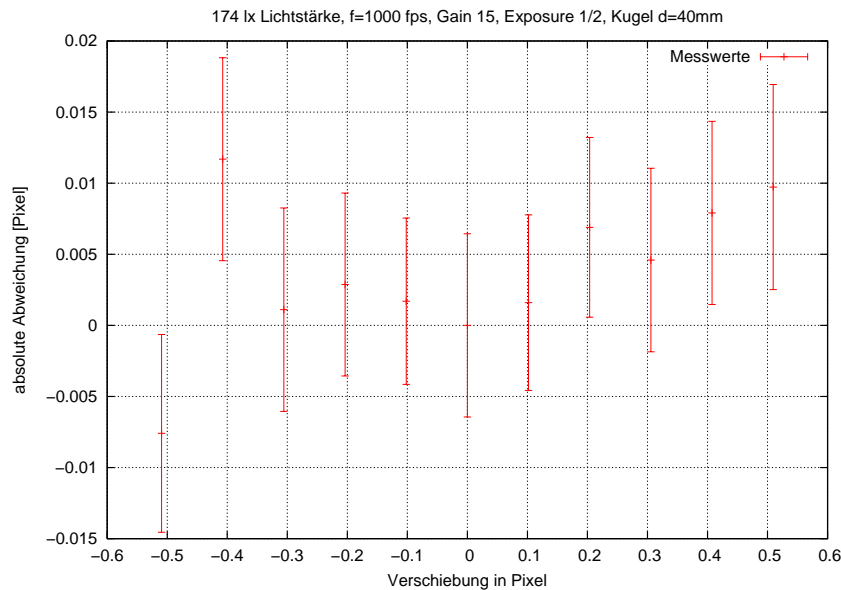


Abb. 4.4: x-Verschiebung innerhalb eines Pixels in  $30\mu\text{m}$  Schritten, absolute x-Abweichung

Um den Verlauf des Fehlers als Funktion des Ortes genauer zu quantifizieren als bei der Messung mit Verschiebung um einen Millimeter, wurde als die Distanz innerhalb

eines Pixel in  $\Delta x = \frac{1}{10}$  Pixel Schritten gemessen, also in  $\Delta x = 30 \mu\text{m}$  Schritten. Das Ergebnis befindet sich in **Abbildung 4.4**. Dort erkennt man die in **Abschnitt 4.1.2** bereits angesprochene Wellenform des absoluten Fehlers. Die Abstände von  $\Delta x = \frac{1}{10}$  Pixel sind aber zu groß, um genauere Aussagen treffen zu können. Ebenfalls reicht eine Periode nicht aus, um festzustellen, ob es sich tatsächlich um eine periodische Wellenfunktion handelt.

Für die Berechnung wurde der Nullpunkt auf einen halben Pixel gesetzt. Das heißt, dass sich der absolute Fehler auf den Wert bei 0,5 Pixeln bezieht. Aus der Radiusberechnung erhält man eine Auflösung pro Pixel:  $S = (294.47 \pm 0.78) \mu\text{m}$ .

### Messung unter optimalen Bedingungen

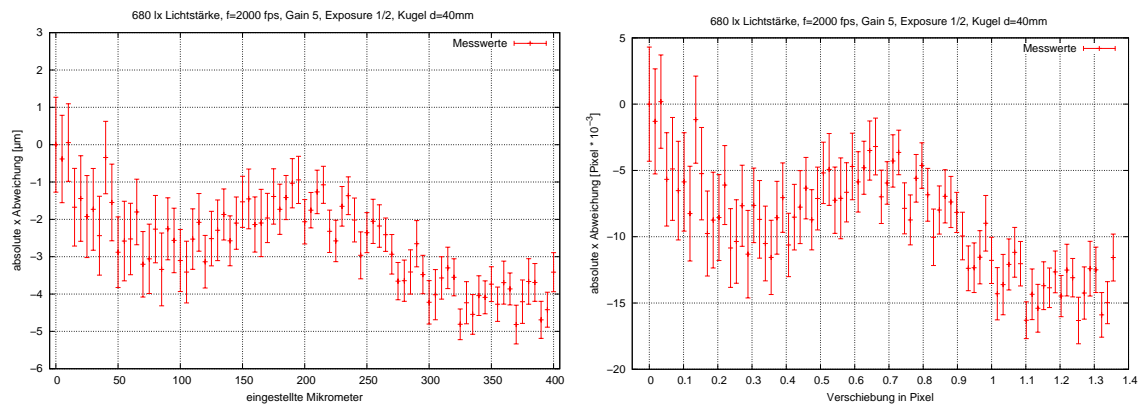


Abb. 4.5: x-Verschiebung innerhalb eines Pixels, absolute x-Abweichung bei Gain 5 - links in Mikrometern, rechts in Pixeln

Im nächsten Schritt wurde die Messung in kleineren  $\Delta x$  durchgeführt, es wurde von  $x = 0 \mu\text{m}$  bis  $x = 400 \mu\text{m}$  gemessen, um eine gesamte Periode erkennen zu können. Da hier auch eine hellere Lampe zur Verfügung stand, wurden die Lichtstärke und die Frequenz erhöht und der Verstärkungsfaktor erniedrigt, sodass nun bei  $L = 680 \text{ lx}$ ,  $f = 2000 \text{ fps}$ , Gain 5 und Belichtungsfaktor 1/2 gemessen wurde.

In **Abbildung 4.5** sind die Ergebnisse graphisch aufgetragen. Das linke Bild zeigt den absoluten Fehler in Mikrometern an, das rechte in Pixeln. Der Fehler liegt in einem Band von  $\pm 3 \mu\text{m}$  bzw.  $\pm \frac{1}{100}$  Pixel um den lokalen Mittelwert. Demnach kann die Position der Kugel auf  $\frac{1}{50}$  Subpixel genau bestimmt werden (siehe **Abbildung 4.5**). Die bereits vermutete Wellenfunktion des Fehlers lässt sich erkennen. Die Fehlerbalkenlänge fällt zum Ende hin, weil als Bezugspunkt der erste Punkt gewählt wurde und sich alle folgenden Verschiebungen auf diesen Punkt beziehen.

Allerdings fällt auch auf, dass zusätzlich zu der Schwingung eine Überlagerung mit einer linearen Funktion zu geben scheint. Daher wurden die Werte mit einer Linearkombination aus einer Schwingungs- und einer linearen Funktion gefittet:

$$f(x) = \left[ Ax + B \sin \left( \frac{2\pi}{E} x + C \right) \right] + D \quad (4.1)$$

Die Graphik befindet sich in **Abbildung 4.6**. Die Kurve trifft die Werte recht gut, allerdings gibt es keine physikalische Begründung.

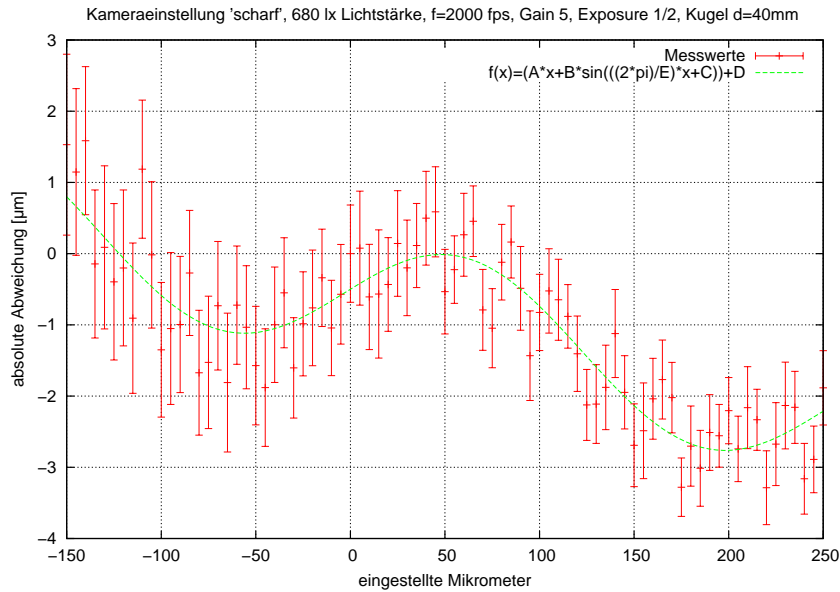


Abb. 4.6: x-Verschiebung um 400  $\mu\text{m}$  bei Gain 5, gefittete absolute x-Abweichung

Die Ergebnisse des Fits sind:

$$A = -0,00647 \pm 0,00056 \text{ (8,68\%)}$$

$$B = 0,9269 \pm 0,0813 \text{ (8,77\%)}$$

$$C = 0,0987 \pm 0,1132 \text{ (114,80\%)}$$

$$D = -0,5909 \pm 0,0765 \text{ (12,94\%)}$$

$$E = 254,114 \pm 8,062 \text{ (3,17\%)}$$

Der Fit gibt den Kurvenverlauf wieder. Interessant ist der Parameter E, er gibt die Periodenlänge an. Diese sollte genau der Auflösung  $S \approx 300 \mu\text{m}/\text{px}$  entsprechen. Bei dieser Messung betrug sie aus der Radiusberechnung:  $S = (295,09 \pm 1,40) \mu\text{m}/\text{px}$ .

Laut Fit beträgt sie  $(254,114 \pm 8,062) \mu\text{m}/\text{px}$ . Die Annahme, dass eine Schwingung genau einem Pixel entspricht, könnte stimmen, allerdings sind ca. 14% Abweichung ziemlich hoch. Um dies genauer zu überprüfen, müsste man mehrere Perioden in kleinen Schritten aufnehmen, dies ließe sich im Rahmen einer fortführenden Arbeit untersuchen.

Der lineare Anteil könnte einerseits aus der Radiusberechnung des Verfahrens kommen, andererseits könnten die Objektebene und die Kameraebene zueinander verdreht sein, das heißt, dass der Versteller und die Kamera nicht horizontal stehen. Um das zu überprüfen, wurde einerseits zusätzlich zur x-Bewegung des Mittelpunktes der Kugel die y-Bewegung ermittelt. Aus der x- und y-Bewegung wurde nun die Gesamtbewegung  $z = \sqrt{x^2 + y^2}$  errechnet und aufgetragen.

Andererseits wurde mithilfe eines Neigungsmessers der Winkel des Verstellertisches gemessen sowie eine Bildsequenz des Neigungsmessers aufgenommen und dieser Winkel auf dem Bild bestimmt. Es ergab sich ein Gesamtwinkel von:  $\alpha = (1,044 \pm 0,112)^\circ$  gegen die Horizontale. Da der Tisch aber zur Durchführung immer wieder auf- und abgebaut wurde, kann dieser Winkel variiert haben.

Es stellt sich heraus, dass der Winkel  $\alpha = \arctan\left(\frac{y_{\max} - y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}\right) = 8,17^\circ$  beträgt. Bei diesem Wert wäre zu vermuten, dass der Einfluss des Winkels auf den Fehler in der x-Bewegung größer ist als dargestellt. In **Abbildung 4.7** befindet sich der ab-

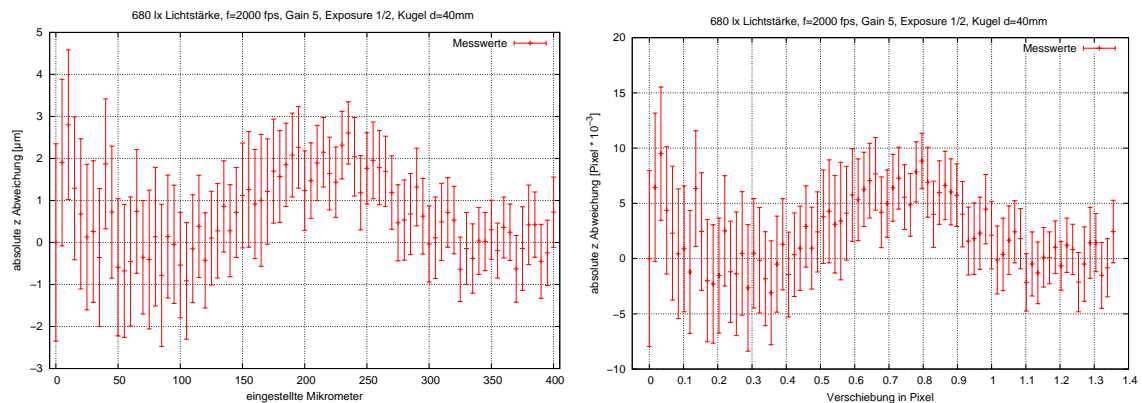


Abb. 4.7: x-Verschiebung innerhalb eines Pixels bei Gain 5, absolute z-Abweichung - links in Mikrometern, rechts in Pixeln

solute Fehler der z-Bewegung in Mikrometern und Pixeln. Dort erkennt man, dass der Fehler im selben Bereich schwingt wie der absolute Fehler der x-Bewegung (vgl. **Abbildung 4.5**:  $\pm 3 \mu\text{m}$  bzw.  $\pm \frac{1}{100}$  Pixel). Nur der lineare Anteil ist nicht mehr



vorhanden. Die großen Fehlerbalken kommen daher, dass sowohl der Fehler der x- als auch der Fehler der y-Bewegung berücksichtigt werden muss.

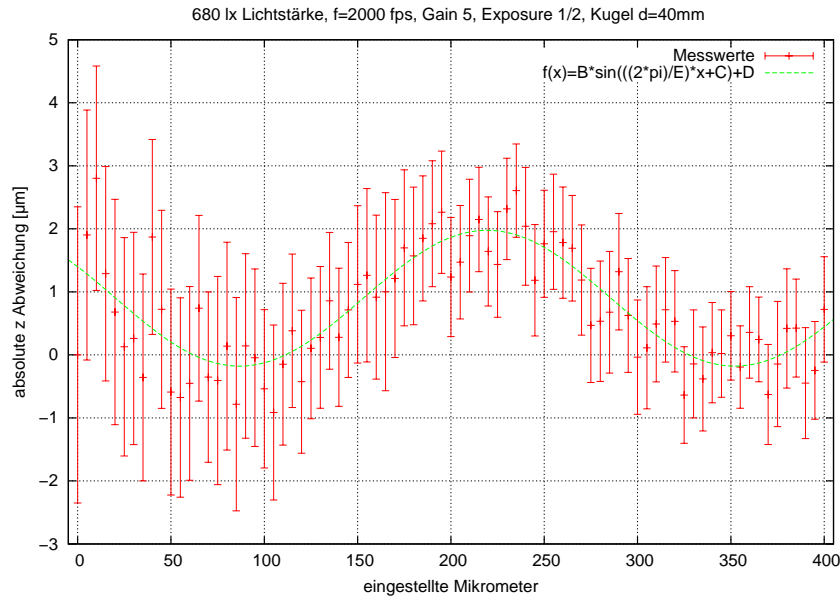


Abb. 4.8: x-Verschiebung um 400  $\mu\text{m}$  bei Gain 5, gefittete absolute z-Abweichung

Diese Werte wurden ebenfalls gefittet, um zu überprüfen, ob die Güte ohne den linearen Term besser wird. Die dazugehörige Graphik befindet sich in **Abbildung 4.8**. Die Ergebnisse des Fits mit der Funktion

$$f(x) = B \sin\left(\frac{2\pi}{E}x + C\right) + D \quad (4.2)$$

sind die Folgenden:

$$B = 1,0782 \pm 0,0692 \text{ (6,42\%)}$$

$$C = 2,6597 \pm 0,1726 \text{ (6,49\%)}$$

$$D = 0,8994 \pm 0,0519 \text{ (5,77\%)}$$

$$E = 265,382 \pm 7,45 \text{ (2,81\%)}$$

Ein Fit mit **Formel 4.1** ergab, dass der lineare Anteil gleich Null war. Auch hier liegt der Parameter E wieder fast im Bereich der Auflösung von  $S \approx 300 \mu\text{m}/\text{px}$ .

### Messung unter schlechten Bedingungen

In **Abbildung 4.9** ist der absolute Fehler in der Positionsbestimmung bei der kleinen Kugel ( $d = 30 \text{ mm}$ ) aufgetragen. Es wurde zwar bis  $x = 400 \mu\text{m}$  gemessen, leider

musste die Messung zwischendurch unterbrochen werden, sodass man bei der Verschiebung nach  $175\text{ }\mu\text{m}$  einen Sprung in den Messwerten erkennt. Dennoch wurden die ersten Werte, welche unterbrechungsfrei aufgenommen wurden, ausgewertet.

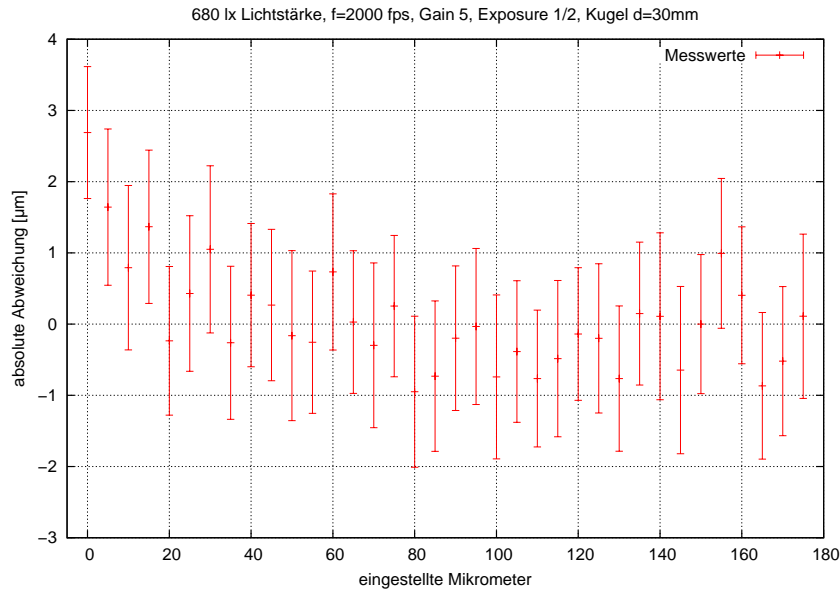


Abb. 4.9: absoluter Fehler in der Positionsbestimmung bei der Verschiebung der kleinen Kugel um  $175\text{ }\mu\text{m}$

Diese Messwerte genügen für die Feststellung, dass auch hier wieder eine leichte Schwebung zu erkennen ist, auch wenn keine ganzen Periode aufgenommen wurde. Der Fehler schwankt aber genau wie bei der großen Kugel im Bereich  $\pm 3\text{ }\mu\text{m}$  bzw.  $\pm \frac{1}{100}$  Pixel. Bei der statischen Messung scheint es also keinen Unterschied zu machen, ob man mit der kleinen oder der großen Kugel misst. Die Auflösung aus der Radiusberechnung betrug auch hier wieder:  $S = (295,41 \pm 1,84)\text{ }\mu\text{m}/\text{px}$

Als nächstes wurde die Messung mit der großen Kugel fast wie unter den optimalen Bedingungen durchgeführt, aber mit Verstärkungsfaktor 1 statt 5.

Auch hier wurde die y-Bewegung gleich mit ermittelt und die z-Bewegung ausgerechnet. Der Winkel der Bewegung betrug hier nur  $3,27^\circ$ . In den **Abbildungen 4.10** und **4.11** sind die absoluten Abweichungen der x- bzw. z-Bewegungen aufgetragen. Wie nach den Ergebnissen aus **Abschnitt 4.1.2** schon erwartet, ist der Fehlerbereich bzw. die Amplitude der Schwingung bei Verstärkung 1 höher als bei Verstärkung 5. Hier schwankt der absolute Fehler um  $\pm 4\text{ }\mu\text{m}$  bzw.  $\pm \frac{1}{80}$  Pixel.

Auch hier wurde die Abweichung in der z-Bewegung zum eingestellten Abstand ge-

## 4.2 Kugelverschiebungen um optische Distanzen

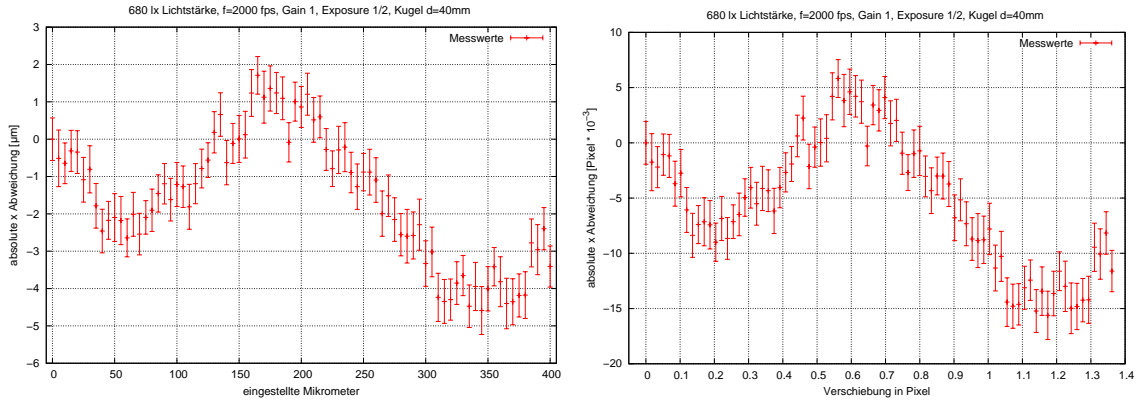


Abb. 4.10: x-Verschiebung innerhalb eines Pixels, absolute x-Abweichung bei Gain 1 - links in Mikrometer, rechts in Pixeln

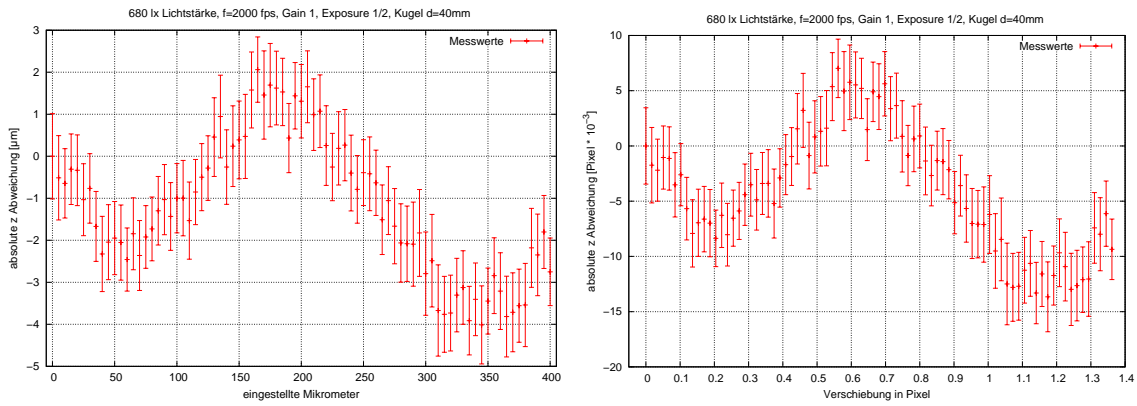


Abb. 4.11: x-Verschiebung innerhalb eines Pixels, z-Abweichung bei Gain 1 - links in Mikrometer, rechts in Pixeln

fittet (**Abbildung 4.12**). Da hier bei der z-Abweichung trotzdem noch ein linearer Anteil zu erkennen ist, wurde **Formel 4.1** benutzt. Die Ergebnisse sind die folgenden:

$$A = -0,00646 \pm 0,00043 \text{ (6,58\%)}$$

$$B = -2,040 \pm 0,072 \text{ (3,53\%)}$$

$$C = 0,31154 \pm 0,07028 \text{ (22,56\%)}$$

$$D = 0,545 \pm 0,098 \text{ (18,03\%)}$$

$$E = 277,702 \pm 3,739 \text{ (1,35\%)}$$

Die Ergebnisse des Fits spiegeln die schlechteren Lichtbedingungen wider. Bei dieser Messung wurde ein Radius von  $R \approx 68,1 \text{ Pixel}$  ermittelt im Gegensatz zu  $R \approx 67,8 \text{ Pixel}$  bei allen anderen Messungen mit der großen Kugel. Wie bereits erwähnt, ist die Kantendetektion bei schlechten Lichtverhältnissen schwieriger, da

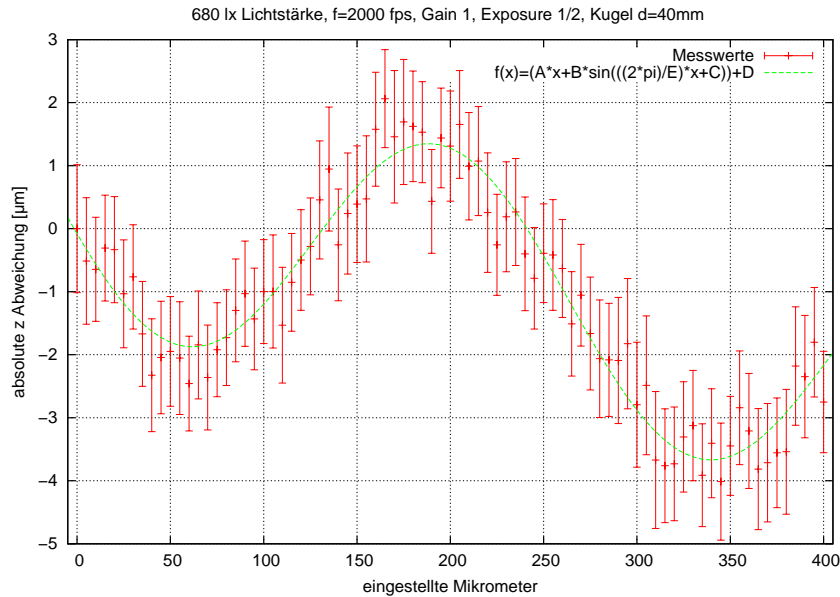


Abb. 4.12: x-Verschiebung um 400  $\mu\text{m}$  bei Gain 1, gefittete absolute z-Abweichung

nicht mehr klar das Maximum der Kante ausgemacht werden kann. Da sich der physikalische Radius aber nicht ändert, und durch diesen die Auflösung bestimmt wird, erhält man bei dieser Messung eine Auflösung von  $S = (293,80 \pm 0,64) \mu\text{m}/\text{px}$ . Dies entspricht nur noch einer Abweichung von etwa 6% zum Fitparameter E, was durchaus im Toleranzbereich liegt. Die noch vorhandene Steigung bei der z-Bewegung könnte darin begründet sein, dass durch den schlechten Kontrast die Radiusdetektion nicht mehr optimal funktioniert und sich der Fehler bis zum Ende der Messung immer weiter aufaddiert. Bei den besseren Bedingungen war bei der absoluten Abweichung der z-Bewegung keine lineare Funktion mehr vorhanden, daher wäre diese Möglichkeit die naheliegendste.

### Kontrollmessung mit festgeschraubter Kugel

Schließlich wurde die Kontrollmessung mit der festgeschraubten Kugel durchgeführt. Der absolute Fehler der x-Bewegung ist in **Abbildung 4.13** aufgetragen. Dort wurde eine Messingkugel mit Durchmesser  $d = 39,9 \text{ mm}$  auf den Stab auf den elektrischen Versteller geschraubt. Diese wurde dann in  $\Delta x = 20 \mu\text{m}$  Schritten um insgesamt 400  $\mu\text{m}$  verschoben. Aus der Abbildung lässt sich deutlich erkennen, dass die Genauigkeit der Positionsbestimmung von 1/50 Subpixel nicht gesteigert werden kann, wenn die Kugel festgeschraubt wird. Aus der Radiusberechnung ergab sich folgende Auflösung:  $S = (300,28 \pm 0,68) \mu\text{m}$

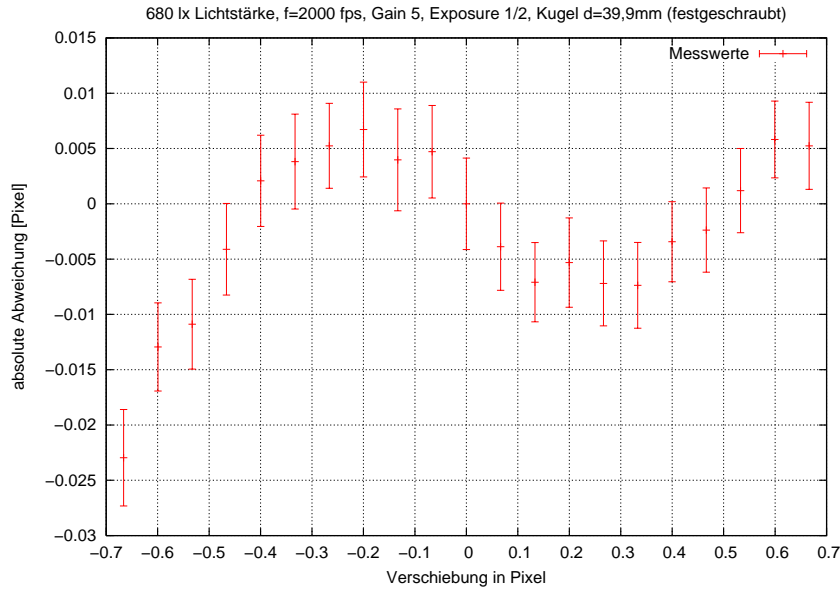


Abb. 4.13: x-Verschiebung innerhalb eines Pixels in  $20 \mu\text{m}$  Schritten bei der festgeschraubten Kugel  $d = 39,9 \text{ mm}$ , absolute x-Abweichung

### 4.3 Diskussion/Zusammenfassung der Ergebnisse

Die statische Messung diente dazu, die Genauigkeit in der Positionsbestimmung des Auswerteverfahrens und der Kamera zu quantifizieren. Dazu wurden Bildsequenzen unter verschiedenen Kameraeinstellungen einer unbewegten Kugel durchgeführt, welche mithilfe eines elektrischen Verstellers um einzelne  $\mu\text{m}$  bewegt werden konnte. Die überraschendste und unerwartete Erkenntnis ist, dass der Fehler die Form einer Schwebung hat. Mögliche Erklärungen könnten sein, dass es an dem Auswerteverfahren liegt. Die Subpixel-Detektion verwendet eine erste Ableitung, um die genaue Position der Kante zu bestimmen (siehe **Abschnitt 2.3** über den Algorithmus). Bei der Positionsbestimmung wird aber nicht nur ein Pixel berücksichtigt, sondern der gesamte Kreis. Daher wird die Kante und der Fehler über das ganze Bild gemittelt. Da diese Arbeit auch zur Weiterentwicklung der Software führte, hat S. Laurence mit diesen Verfahren künstlich erzeugte Bilder untersucht, die Ergebnisse sind in **Abbildung 4.14** dargestellt [Quelle: Persönliche Mitteilung].

Zu sehen ist die aktuelle  $x_0$ - und  $y_0$ -Position des Mittelpunktes sowie der Radius eines Kreises in Pixel, im linken Bild ist  $R = 67,77 \text{ Pixel}$ , was in dieser Arbeit der großen

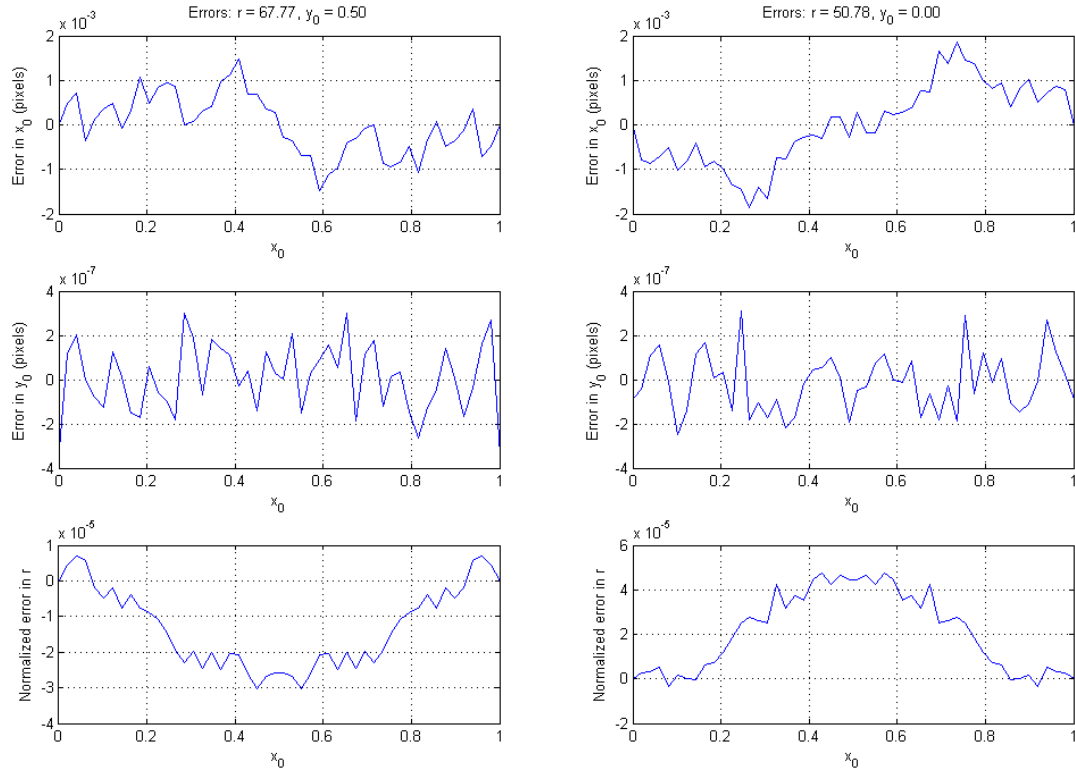


Abb. 4.14: Fehler in der Positionsbestimmung bei künstlich erzeugten Bildern - Links: Große Kugel, Rechts: Kleine Kugel

Kugel mit  $d = 40$  mm entspricht, im rechten Bild  $R = 50,78$  Pixel, das entsprach einem Radius  $d = 30$  mm. Der künstliche Kreis wurde ebenfalls um einen Pixel verschoben und der Fehler in der x-Positionsbestimmung liegt bei ca.  $\frac{1}{250}$  Pixel, also deutlich niedriger als bei den Experimenten. Interessanter ist aber die Tatsache, dass in der x-Abweichung ebenfalls eine Schwebung zu erkennen ist. Diese Eigenschaft kommt also eindeutig aus dem Verfahren und nicht aus dem Experiment. Ebenfalls interessant ist, dass die Fehler in der Radiusbestimmung und der y-Bewegung klein gegen den x-Fehler sind. Während der Auswertung der Experimente ergab sich die Frage, woher der lineare Anteil in den Fehlern kam. Es kam die Vermutung auf, es könnte der Fehler aus der Radiusbestimmung sein, welcher sich aufsummiert. Da dieser aber im Bereich  $10^{-3}\%$  ist (in den Bildern ist er normalisiert mit  $r$  angegeben) fällt er nicht ins Gewicht.

Eindeutig aus den Experimenten hervorgegangen ist die Tatsache: Der Fehler von  $\sigma_x = \pm 3 \mu\text{m}$  der optischen Kraftmesstechnik ist vorerst nicht zu verringern. Es

können noch Verbesserungen an der Software vorgenommen werden, woran bereits gearbeitet wird.

Zur Analyse der Schwebung sollten Experimente über mehrere Pixel/Periodenlängen in geringen Abständen  $\Delta x$  hinweg durchgeführt werden.

Wichtig ist zudem, die Messungen ohne Unterbrechungen an einem Stück durchzuführen. Der elektrische Verstärker hat zwar einen Hystereseaussgleich, der aber beim Ausschalten verlorengeht.





# 5 Fallexperimente

## 5.1 Versuchsaufbau und Durchführung

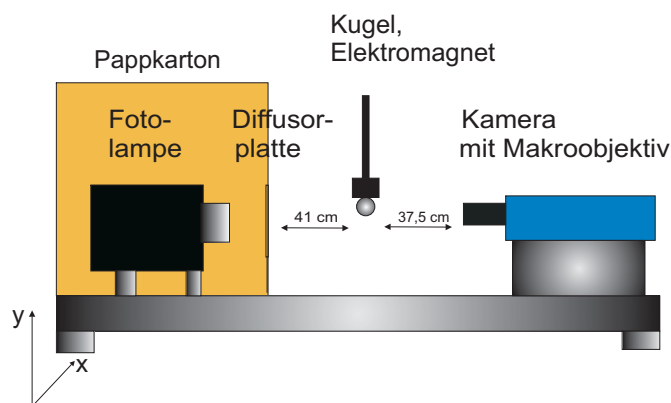


Abb. 5.1: Versuchsaufbau für die Fallexperimente

Für die Fallexperimente wird der Versuchsaufbau geändert: Die Kugel ( $d=30\text{mm}$ ) wird von einem Elektromagneten gehalten, dessen Schalter direkt mit einer Triggerbox für die Kamera verbunden ist, sodass diese mit der Aufnahme startet sobald das Magnetfeld abgeschaltet ist. Das Schema des Versuchsaufbaus befindet sich in **Abbildung 5.1**.

Da die Kamera jedoch nur 102 Bilder speichern kann, ist es erforderlich, den Aufnahmezeitpunkt hinter den Triggerzeitpunkt zu setzen, sodass die Kugel bereits fällt sobald die Aufnahme beginnt. Dadurch sollen die Einflüsse des Magnetfeldes bereits soweit wie möglich abgeklungen sein. Ebenfalls sollten zwischen der Kugel und dem oberen Rand des Bildes mindestens fünf Pixel liegen, damit die Auswerteroutine mit MATLAB die Kanten der Kugel genauer detektieren kann.

Als Lichtquelle wird hier eine Fotolampe verwendet, die so hell ist, dass das Bild genügend ausgeleuchtet wird und die durch die hohe Aufnahmegeschwindigkeiten niedrigen Belichtungszeiten aber dennoch ausreichen.

Die Kameraeinstellungen hierbei sind:  $f = 2000 \text{ fps}$ , Verstärkungsfaktor 5, Belich-

## 5 Fallexperimente

tungsfaktor  $1/2$ . Die Lichtstärke beträgt  $L = 680 \text{ lx}$ . In **Abbildung 5.2** sind einige Bilder dieser Messreihe zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten dargestellt.

Ist der richtige Trigger(Verzögerungs-)Zeitpunkt gefunden, werden zehn Messungen mit denselben Einstellungen durchgeführt.

Ebenfalls werden weitere fünf Messungen bei einer Frequenz von  $f = 4000 \text{ fps}$ , Verstärkungsfaktor 15, und Belichtungsfaktor  $1/2$  durchgeführt sowie fünf Messungen mit der großen Kugel ( $d = 40 \text{ mm}$ ) bei denselben Einstellungen.

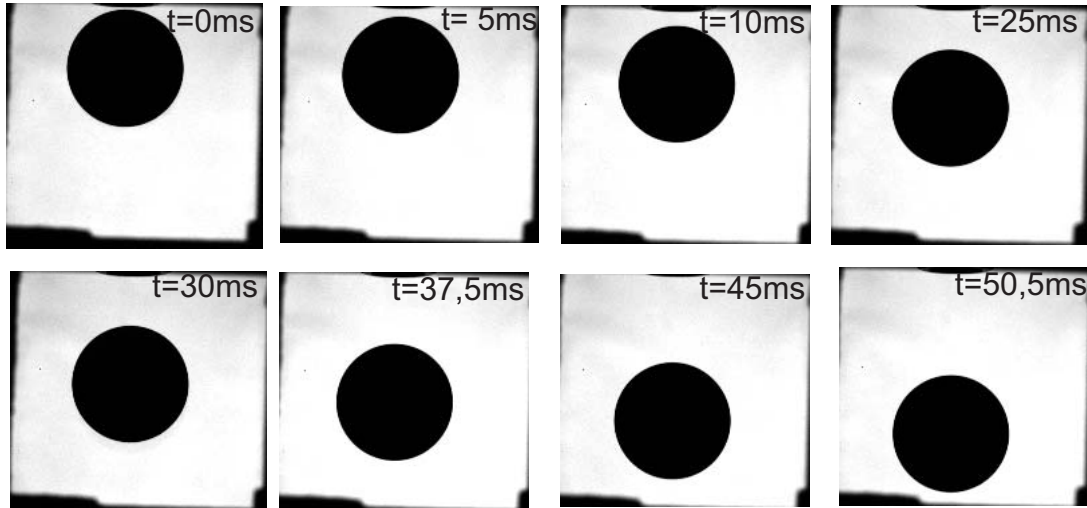


Abb. 5.2: Darstellung der fallenden Kugel ( $d=30 \text{ mm}$ ) zu verschiedenen Aufnahmezeiten bei einer Messung mit  $f=2000 \text{ fps}$ , Verstärkungsfaktor 5

## 5.2 Ergebnisse der Fallexperimente

Ausgewertet wurden die Positionen der Kugel bei allen Filmen wieder mithilfe des MATLAB-Programms. So erhält man die Zeit und die y-Position der Kugel. Diese werden aufgetragen und mithilfe der folgenden Funktion gefittet:

$$y(t) = \frac{1}{2}gt^2 + v_0t + y_0 \quad (5.1)$$

mit den Konstanten  $v_0$  und  $y_0$ . Diese sind nötig, da der absolute Startpunkt, aufgrund der Ungenauigkeit in der Positionsbestimmung, nicht bestimmt werden kann und die Kugel auf dem ersten Bild bereits eine gewisse Strecke  $y_0$  gefallen ist und eine Geschwindigkeit  $v_0$  hat.

Es wurde sowohl mit MATLAB als auch mit GNUpot gefittet. Da beide Programme unterschiedliche Algorithmen benutzen, werden leicht unterschiedliche Werte für  $g$  ausgegeben. Die Differenz der Werte für  $g$  liegt aber über eine Größenordnung unterhalb des Fehlers, der durch den Fit angegeben wird. Die folgenden Ergebnisse wurden mit GNUpot erstellt. Es werden nicht alle durchgeführten Messungen im Detail diskutiert, sondern die Messung mit der größten Standardabweichung der Messreihe herausgegriffen, um die maximale Fehlerspanne aufzuzeigen.

### 5.2.1 Fallexperimente mit der kleinen Kugel ( $d=30$ mm) bei einer Aufnahmefrequenz von $f=2000$ fps

Die ersten zehn Messungen bei einer Frequenz von  $f = 2000$  fps, Verstärkungsfaktor 5 und Belichtungsfaktor  $1/2$  werden bei einer Verzögerung von 54 ms durchgeführt. Bei dieser Einstellung befindet sich die Kugel die ganze Aufnahmezeit über sichtbar im Bild. Allerdings mussten hier die ersten fünf Bilder von der Auswertung ausgeschlossen werden, da die Grenze von fünf Pixeln zum oberen Rand nicht erfüllt war. Es wurde über 89 Messwerte gefittet.

Aus der statischen Messung ergab sich ein maximaler absoluter Positionsfehler von  $\sigma_x = \pm 3 \mu\text{m}$ . Nach **Formel 2.13** aus **Abschnitt 2.2.3** gilt für den Fehler der Beschleunigung für  $n = 89$  Messwerte über einen Zeitraum  $\Delta t = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ s}$ :

$$S(a) = 0,0373 \%$$

Dieser sollte genauso groß sein, wie die Standardabweichung beim Fit.

In **Abbildung 5.3** ist eine der zehn Messungen aufgetragen. Zu sehen ist die y-t Trajektorie, der Fit der Messwerte mithilfe der **Formel 5.1** sowie der theoretisch zu erwartende Verlauf mit den gefitteten Werten für die beiden Konstanten.

Für die Erdbeschleunigung wurde mithilfe GNUpot ein Wert  $g = (9,77403 \pm 0,005968) \text{ m/s}^2$  ermittelt, der prozentuale Fehler beträgt 0,0611%. Er liegt viel höher (~60%) als der erwartete Fehler. Von den zehn Messungen liegen vier über, und sechs unter dem erwarteten Fehler  $S(a)$ . Diese bewegen sich im aber Bereich von  $\pm 10\%$  um  $S(a)$ . Da in den theoretischen Fehler nicht alle erdenklichen Fehlerquellen, sondern nur  $\sigma_x$  und  $n$  eingehen, konnten diese Ergebnisse erwartet werden. Die hier gezeigte Messung ist die mit dem größten Fehler, da die anderen Messungen alle einen viel kleineren Fehler aufweisen (0,033-0,048%). Diese Spanne liegt auch hier wieder im

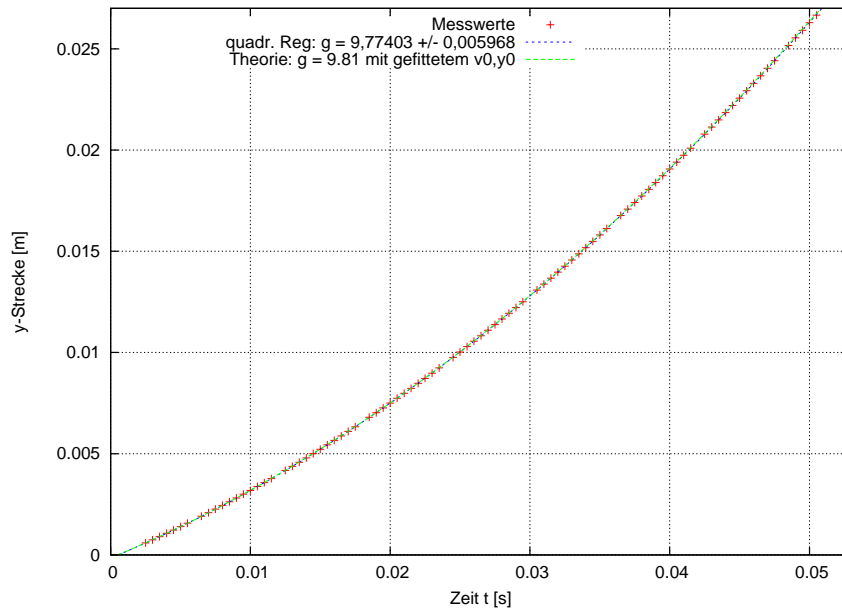


Abb. 5.3: Graphische Darstellung bei einer Messung mit  $f=2000$  fps, Verstärkungsfaktor 5, Kugel  $d = 30$  mm

Bereich des erwarteten Fehlers.

Als gewichteter Mittelwert über alle 10 Messungen ergibt sich nun:

$$g = (9,8056 \pm 0,0059) \text{ m/s}^2$$

Das entspricht einer Abweichung vom Literaturwert für Göttingen (siehe **Abschnitt 2.2.2**) von 0,061%.

### 5.2.2 Fallexperimente mit der kleinen Kugel ( $d=30$ mm) bei einer Aufnahmefrequenz von $f=4000$ fps

Um zu überprüfen, wie sich der Wert für  $g$  verhält, wenn man eine schnellere Aufnahmegeschwindigkeit wählt, wird auch diese Messung durchgeführt. Da bei einer schnelleren Frequenz die Belichtungszeit kürzer ist, wird der Verstärkungsfaktor auf den Wert 15 erhöht. Der Triggerzeitpunkt wurde hier auf 56 ms gesetzt, da die Aufnahmegeschwindigkeit höher ist.

In **Abbildung 5.4** ist die Bewegungstrajektorie  $y-t$  sowie der Fit der Messwerte einer der fünf Messungen graphisch aufgetragen. Gefittet wurde über 93 Messwerte. Bei einer Aufnahmefrequenz von  $f = 4000$  fps, also einer Aufahmedauer von

$t = 25,25 \text{ ms}$  und  $n = 93$  Messpunkten ergibt sich ein theoretischer Fehler:

$$S(a) = 0,1321\%$$

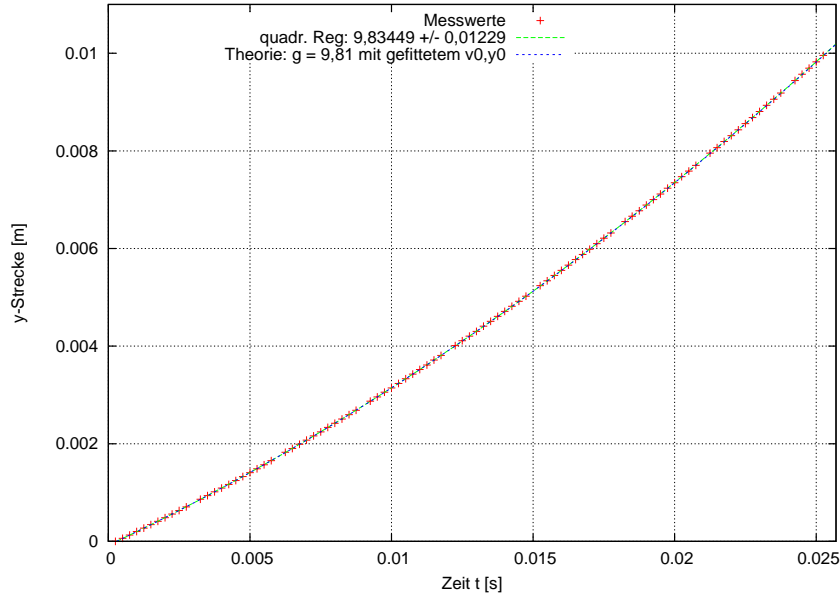


Abb. 5.4: Graphische Darstellung bei einer Messung mit  $f = 4000 \text{ fps}$ , Verstärkungsfaktor 15, Kugel  $d = 30 \text{ mm}$

Beim Fit dieser Messung wurde mithilfe GNUPLOT ein Wert  $g = (9,83449 \pm 0,01229) \text{ m/s}^2$  ermittelt, die prozentuale Abweichung von 0,1250% ist also kleiner als die erwartete Abweichung  $S(a)$ .

Der gewichtete Mittelwert der fünf Messungen für die Erdbeschleunigung in diesem Fall beträgt:

$$g = (9,7809 \pm 0,0050) \text{ m/s}^2$$

Das entspricht einer Abweichung vom Literaturwert für Göttingen von 0,313%

### 5.2.3 Fallexperimente mit der großen Kugel ( $d=40 \text{ mm}$ ) bei einer Aufnahmefrequenz von $f=4000 \text{ fps}$

Die nächsten fünf Messungen wurden mit der großen Kugel durchgeführt, um auch hier zu überprüfen, ob es Unterschiede zu den anderen Messungen gibt. Die Aufnahmefrequenz betrug hier ebenfalls  $f = 4000 \text{ fps}$ , da die Kugel bei einer niedrigeren Frequenz vor Ablauf der Bildsequenz unten aus dem Bild fiel, dementsprechend

## 5 Fallexperimente

musste der Verstärkungsfaktor 15 gewählt werden. Als Triggerzeitpunkt wurden hier 52 ms gewählt, um die fünf Pixel zum oberen Rand einzuhalten. In **Abbildung 5.5** ist eine der Messungen graphisch aufgetragen. Gefittet wurde ein Wert  $g = (9,80505 \pm 0,01073) \text{ m/s}^2$ , die Standardabweichung in Prozent beträgt 0,1094 %. Sie ist also etwas niedriger als der erwartete Fehler, obwohl dieselbe Frequenz verwendet wird. Da bei dieser Messung die große Kugel verwendet wurde, standen bei der Kantendetektion entsprechend mehr Kantenpunkte zur Verfügung, daher verringert sich auch der Fehler.

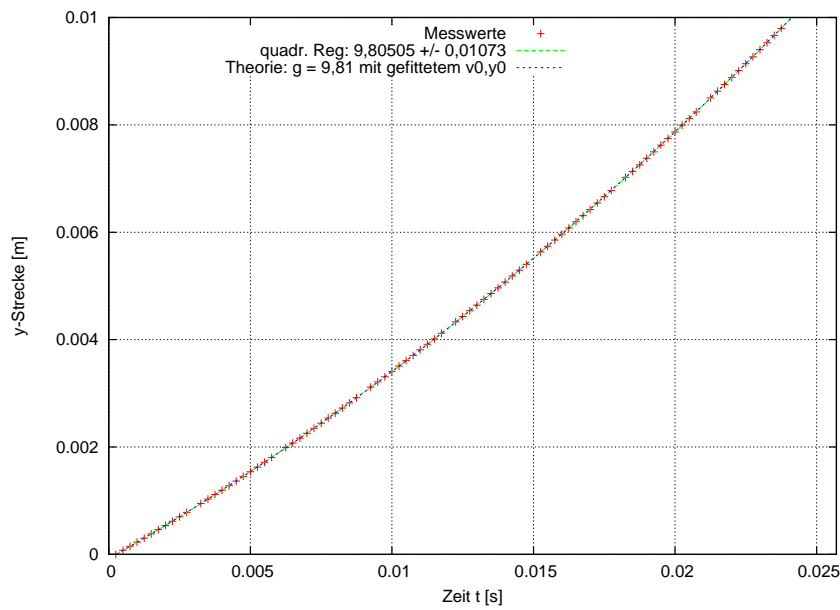


Abb. 5.5: Graphische Darstellung einer Messung mit  $f = 4000 \text{ fps}$ , Verstärkungsfaktor 15, Kugel  $d = 40 \text{ mm}$

Der gewichtete Mittelwert über diese fünf Messungen beträgt:

$$g = (9,80898 \pm 0,00457) \text{ m/s}^2$$

Das entspricht einer Abweichung vom Literaturwert für Göttingen von 0,026%. Diese Messung lieferte also die besten Ergebnisse der drei Messungen.

## 5.3 Diskussion der Fallexperimente

### 5.3.1 Probleme bei der Durchführung der Experimente

Wie in der Theorie bereits ausgeführt, wurden die Fallexperimente durchgeführt, da sie, wie ein Experiment im HEG, eine konstante Beschleunigung besitzen.

Doch bis die Experimente in dieser Form, wie sie hier beschrieben wurden, durchgeführt werden konnten, mussten viele Testmessungen durchgeführt werden. Zunächst wurde die Kugel an einem Faden aufgehängt und fallengelassen. Die Kamera wurde mithilfe einer Lichtschranke, bestehend aus einer Fotodiode und einem Laserpointer, getriggert. Das Problem lag in dem Faktum begründet, die Kugel immer wieder auf die selbe Höhe zu hängen. Ebenfalls war der Faden im Bild zu erkennen und die Kantendetektion hat die Klebestelle des Fadens und den Faden selbst zum Radius hinzuaddiert, sodass diese Möglichkeit dann ausfiel.

Der nächste Schritt war der Einsatz des Elektromagneten, der sich schließlich bewährte, da er sich direkt an die Triggerbox anschließen ließ. Die Kamera nahm auf, sobald das Magnetfeld abgeschaltet war. Bei den ersten Messungen stellte sich zunächst heraus, dass der gemessene Wert für die Erdbeschleunigung viel zu niedrig war ( $\sim 9,3 \text{ m/s}^2$ ). Dafür kommen mehrere Gründe in Betracht:

- Einflüsse des Magnetfeldes: Auch wenn der Strom des Elektromagneten abgeschaltet war, ist trotzdem noch eine Restmagnetisierung des Kerns vorhanden, die erst abklingen muss. Dadurch kann die Kugel am Anfang ihres Falls noch magnetisiert sein und wird deshalb abgebremst.
- Fehler in der Positionsbestimmung zu Beginn des Falls: Aus den statischen Messungen war bekannt, dass der Fehler  $\sigma_x = 3 \mu\text{m}$  beträgt. In **Abschnitt 2.2.1** in **Abbildung 2.3** erkennt man, dass gerade bei den ersten Bildern nur wenige Mikrometer zurückgelegt werden. Das heißt, dass der Fehler bei den ersten Bildern in der Größenordnung der zurückgelegten Distanz liegt. Das führte dazu, dass es nicht möglich war, den Startpunkt des Fallens zu bestimmen, wenn die Kugel auf dem ersten Bild noch nicht fiel.
- Optimale Kantendetektion: Um die Kanten der Kugel optimal detektieren zu können, muss die Kugel während der gesamten Bildsequenz gut im Bild zu erkennen sein. Das heißt, sie muss bereits vom oberen Bildrand entfernt sein, damit der Bildrand nicht als Objektkontur interpretiert werden kann. Am

besten und am geringsten fehleranfällig stellte sich ein Abstand von mindestens fünf Pixeln zum oberen Rand heraus.

Der Triggerzeitpunkt muss also so gewählt werden, dass die Kugel bereits fällt, wenn die Kamera mit der Aufnahme startet, damit alle oben genannten Fehlerfaktoren weitestgehend ausgeschlossen werden können und nur die Erdbeschleunigung auf die Kugel wirkt.

### 5.3.2 Diskussion der Ergebnisse

Alle erzielten Messergebnisse wurden mit **Formel 5.1** gefittet, diese liefert den Wert für  $g$  und die Standardabweichung. Diese Formel berücksichtigt die Tatsache, dass die Kugel auf dem ersten Bild bereits eine gewisse Strecke  $y_0$  gefallen ist und eine Geschwindigkeit  $v_0$  besitzt.

In **Abschnitt 2.2.3** wurde die Formel für den erwarteten Fehler  $S(a)$  der Beschleunigung hergeleitet. Sie beschreibt den Fehler der Beschleunigung beim besten Fit von  $n$  Messwerten bei konstanter Beschleunigung und bekanntem Fehler  $\sigma_x$  im Ort. Die Standardabweichungen der Beschleunigungen der durchgeführten Messungen liegen alle im Bereich dieses Fehlers. Das heißt, die Experimente spiegeln die theoretischen Erwartungen wieder. Abweichungen kommen vermutlich daher, dass die Formel die anderen experimentellen Bedingungen, wie das abklingende Magnetfeld sowie den Fehler in der Zeit und andere Faktoren vernachlässigt. Die Messung mit der großen Kugel lieferte die kleinste Abweichung vom Literaturwert mit nur 0,026 %. Hier standen bei der Kantendetektion mehr Punkte zur Verfügung, sodass die Position und damit die Beschleunigung genauer bestimmt werden konnte. Bei den statischen Messungen gab es zwar keinen Unterschied zwischen den beiden Kugeln, aber bei den Fallexperimenten spielt die Größe der Kugel offensichtlich eine Rolle. Insgesamt sind die Ergebnisse wie oben aufgeführt sehr zufriedenstellend. Die gewichteten Mittelwerte der jeweiligen Messungen weichen maximal 0,313% vom Literaturwert ab, der selbst nur bis zur vierten Nachkommastelle angegeben wird.



## 6 Anwendung der Ergebnisse für die ExoMars-Kampagne im HEG

Diese Experimente wurden durchgeführt, um Aussagen darüber treffen zu können, ob die optische Kraftmesstechnik im HEG Anwendung finden kann.

Für die EXOMARS-Kampagne sind in der Zwischenzeit Kalibrierungsmessungen durchgeführt worden. Dabei wurde der Staudruck über eine Zeitspanne von  $\Delta t = 10$  ms gemessen. In **Abbildung 6.1** ist dieser sowie die Beschleunigung des Modells über einen Zeitabschnitt von  $\Delta t = 4$  ms aufgetragen.

Die Beschleunigung wurde mit **Formel 2.5** aus **Abschnitt 2.2.1** bestimmt. Die Masse des EXOMARS-Modells beträgt  $m = 3,46$  kg der Radius  $r = 90$  mm.

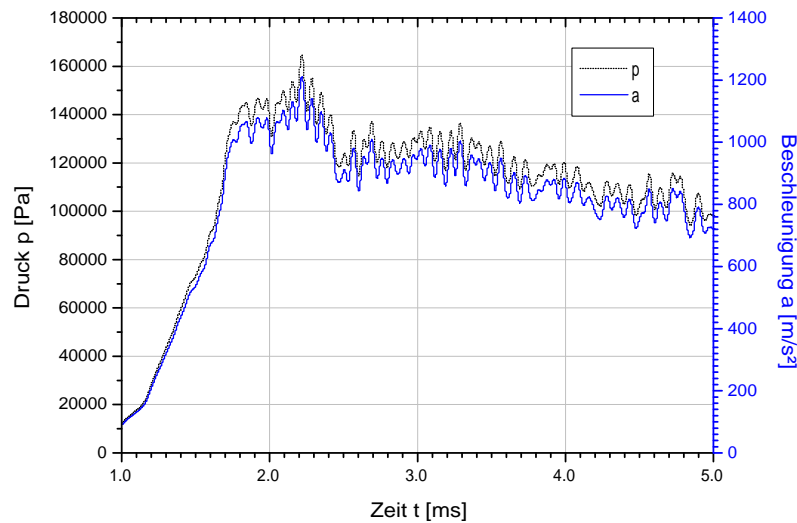


Abb. 6.1: Verlauf des Staudruckes bzw. der Beschleunigung unter Bedingungen der EXOMARS-Kampagne im HEG

Nur im Bereich zwischen 2,5 und 3,3 ms ist der Druck bzw. die Beschleunigung annähernd konstant. In diesen  $t = 0,8$  ms beträgt die mittlere Beschleunigung  $a \approx 931 \text{ m/s}^2$ , die Kapsel legt also eine Strecke  $d \approx 300 \mu\text{m}$  zurück. Diese Zeitspanne kann für die Kraftmessung verwendet werden.

Um zu bestimmen, wie genau die optische Messtechnik unter diesen Umständen arbeiten würde, werden die in **Kapitel 4** beschriebenen Ergebnisse benutzt, dass der Fehler in der Positionsbestimmung  $\sigma_x = 3\mu\text{m}$  beträgt (Voraussetzung hierfür ist eine ähnliche Abbildungsgröße).

**Formel 2.13** für den Fehler der Beschleunigung aus **Abschnitt 2.2.3** ist in Abhängigkeit von der Zahl der aufgenommenen Bilder in **Abbildung 6.2** für bis zu 102 Bilder aufgetragen.

Da der Staudruck im HEG selbst nicht genauer als auf 2 % bestimmt werden kann, wurde die gleiche Fehlergrenze für die Beschleunigungsmessung als akzeptabel angenommen.

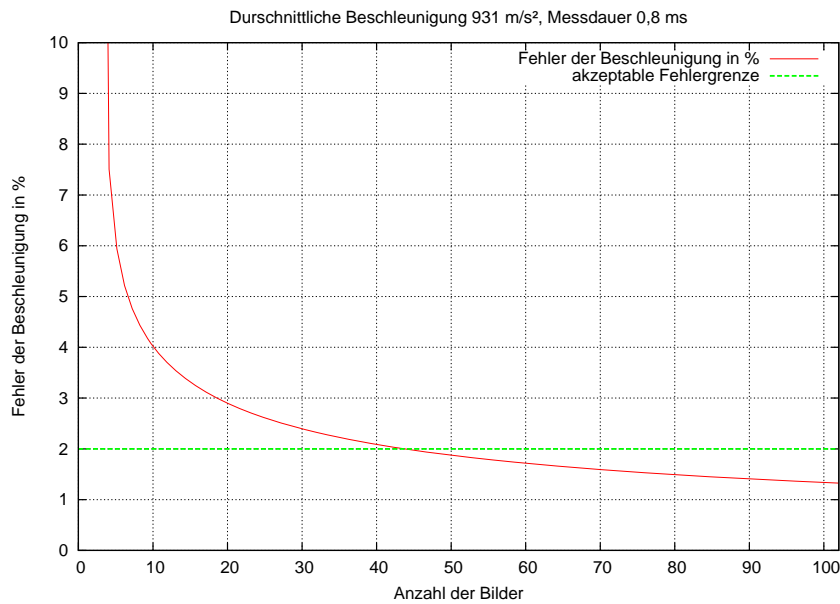


Abb. 6.2: Verlauf des Fehlers der Beschleunigung über die Anzahl der Bilder für das EXOMARS-Modell während einer Messzeit von 0,8 ms

Diese Graphik bedeutet, dass wenn der Fehler kleiner als 2% sein soll, innerhalb der 0,8 ms mindestens 45 Bilder aufgenommen werden müssen. Die Aufnahmefrequenz, die dazu bei der Kamera zur Verfügung steht, wäre  $f = 63\text{ kfps}$ . Bei einer Aufnahmefrequenz von  $f = 125\text{ kfps}$  könnten sogar 100 Bilder verwendet werden. Der Fehler liegt dann bei ca. 1,35%.

Die Kamera ist demnach ohne Probleme in der Lage, die Bewegung des Modells aufzunehmen. Der erwartete Fehler in der Beschleunigung ist klein genug, um die optische Kraftmesstechnik im HEG erfolgreich anwenden zu können.

## 7 Zusammenfassung

Für die EXOMARS-Mission der ESA sollte untersucht werden, ob eine optische Kraftmesstechnik mittels Verfolgung einer Kapsel im HEG anwendbar ist.

Zunächst wurde die CCD-Charakteristik der benutzten HPV-1 Kamera untersucht: Der Dunkelstrom ist proportional zum Verstärkungsfaktor, die Anzahl der Hotpixel und das Fixmuster-Rauschen nehmen mit Erhöhung des Verstärkungsfaktors ebenfalls zu. Das Helligkeitsverhalten des Chips über die Belichtungszeit lässt sich gut durch eine kubische Funktion approximieren.

Bei den Kalibrierungsmessungen wurde weiterhin herausgefunden, dass die Kamera einen anwendungsunabhängigen Hardwarefehler besitzt, jedes zwölfte Bild besitzt eine niedrigere Intensität als die anderen Bilder. Da dies zu Problemen in der Objektdetektion führte, mussten die fehlbelichteten Bilder von der Auswertung ausgeschlossen werden.

Aus den Messungen zur Bestimmung der Genauigkeit in der Positionsbestimmung ist die bisher unbekannte Tatsache hervorgegangen, dass der absolute Fehler die Form einer Schwebung hat, dessen Ursachen womöglich in der Kantendetektion zu finden sind, da auch bei der Detektion computergenerierte Objekte diese Schwebung auftritt. Der Fehler bewegt sich unter optimalen Lichtbedingungen in einem Bereich von  $\pm 3 \mu\text{m}$  um den lokalen Mittelwert. Bei der verwendeten Auflösung von  $S \approx 300 \mu\text{m}/\text{px}$  kann die Position des Objektes demnach auf  $\frac{1}{50}$  Subpixel genau bestimmt werden.

Der Fehler in der Positionsbestimmung ist beleuchtungsabhängig, da bei niedrigerem Kontrast die Kanten zwischen Objekt und Hintergrund verschmieren. Infolgedessen wird ein größerer Radius des Objektes ermittelt. Der sich ergebende Fehler summiert sich im Laufe der Messung auf.

Mit den Ergebnissen aus den statischen Messungen konnte schließlich die im Theoriekapitel besprochene erwartete Abweichung von der Beschleunigung bestimmt werden, die im Wesentlichen von der Anzahl der Bilder und dem Fehler in der Ortsbestimmung abhängt. Die Fallexperimente bestätigen diesen Fehler mit leichten Abwei-

chungen. Dies war zu erwarten, da der theoretische Fehler nicht alle experimentellen Fehlerquellen berücksichtigt.

Insgesamt sind die Ergebnisse sehr zufriedenstellend. Die Staudrücke des HEG können im Normalfall auf 2 % genau bestimmt werden. Die gemessenen Werte für die Erdbeschleunigung weichen maximal um 0,313 % vom Literaturwert ab, sind demnach eine Größenordnung genauer. Bei der Berechnung des erwarteten Fehlers bei der Beschleunigung des EXOMARS-Modells im HEG ergab sich ebenfalls eine Abweichung kleiner 2%. Das bedeutet, dass eine Anwendung des Systems zur Beschleunigungsmessung im HEG, gerade im Hinblick auf die bevorstehende EXOMARS-Kampagne, sehr gut möglich ist. Bei den Messungen muss beachtet werden, dass ein optimaler Kontrast zwischen Objekt und Hintergrund vorliegt und die Bewegung des Objektes über eine lange Bildserie aufgenommen wird, da der Fehler im wesentlichen von diesen beiden Faktoren abhängt.

# Literaturverzeichnis

- [1] BOBEY, K.: CCD-Sensoren. In: *Gerd Litfin (Hrsg.): Technische Optik in der Praxis*. Springer Berlin Heidelberg, 1997, Kapitel 7.4, S. 213–220
- [2] CANNY, J.: A Computational Approach To Edge Detection. In: *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 8 (1986), Nr. 6, S. 679–698
- [3] GÖHRING, D.: *Eine vergleichende Betrachtung CCD kontra CMOS*, Humboldt Universität zu Berlin, Diplomarbeit, 2002. <http://www2.informatik.hu-berlin.de/~goehring/papers/ccd-vs-cmos.pdf>. – (Stand: 15.11.2005, Abfrage: 16.07.2009)
- [4] GONZALES, R. C. ; WOODS, R. E.: *Digital Image Processing*. Pearson, 2008
- [5] GRÖNING, H.: *Radiometrische Kalibrierung und Charakterisierung von CCD- und CMOS Bild-Sensoren und monokulares 3D-Tracking in Echtzeit*, Universität Heidelberg, Fakultät für Physik und Astronomie, Diss., 2003. <http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=968090036>. – (Stand: 09.07.2003, Abfrage: 16.07.2009)
- [6] HANNEMANN, K. ; MARTINEZ SCHRAMM, J. ; KARL, S.: Recent Extensions to the High Enthalpy Shock Tunnel Göttingen (HEG). In: *2nd International ARA Days, "10 Years after ARD", Arcachon France, 21-23 October* (2008)
- [7] LAURENCE, S. J.: *Proximal Bodies in Hypersonic Flow*. Pasadena, California Institute of Technology, Diss., 2006
- [8] LAURENCE, S. J. ; KARL, S.: *High-precision visualization-based tracking of rigid, uniaxially rotating bodies (not yet published)*
- [9] MEYER, S. L.: *Data Analysis For Scientists And Engineers*. Wiley New York, 1975

- [10] NIKON CORPORATION (Hrsg.): *AF Zoom-Nikkor Instruction Manual*. Tokyo: Nikon Corporation
- [11] PETERS, M.: *CCD-Sensor.de*. [www.ccd-sensor.de](http://www.ccd-sensor.de). – (Abfrage: 16.07.2009)
- [12] PHYSIKALISCH TECHNISCHE BUNDESANSTALT BRAUNSCHWEIG: *Schwere-Informationssystem (SIS)*. [http://www.ptb.de/de/aktuelles/archiv/nachrichten/2007/\\_sis-direkt.html](http://www.ptb.de/de/aktuelles/archiv/nachrichten/2007/_sis-direkt.html). – (Stand: 03.07.2007, Abfrage: 16.07.2009)
- [13] PIXELINK: *How To Interpret Digital Camera Parameters*. [http://www.pixelink.com/support/oem/cameras/common/image\\_quality\\_specifications/how\\_to\\_interpret\\_camera\\_parameters.htm](http://www.pixelink.com/support/oem/cameras/common/image_quality_specifications/how_to_interpret_camera_parameters.htm). – (Stand: Mai 2008, Abfrage: 16.07.2009)
- [14] POGGEMANN, D.: *Simulation-based Design of a CCD Image Sensor for 1 Million Frames per Second (Anhang)*, Diss., 2005
- [15] ROCKET, P.: The Accuracy of Sub-Pixel Localisation in the Canny Edge Detector. In: *The 10th British Machine Vision Conference*. Department of Electronic & Electrical Engineering, University of Sheffield, September 1999
- [16] SCHINDLER, K.: *Grundlagen der CCD-Technik*. Jugend forscht. <http://www.pixelmask.de>. Version: 2004. – (Abfrage: 16.07.2009)
- [17] SCHWARTZ, R. ; LINDAU, A.: Das europäische Gravitationszonenkonzept nach WELMEC für eichpflichtige Waagen (überarbeitete deutsche Fassung). In: *18. IMEKO-TC3 Konferenz in Celle, 2002*. – <http://www.ptb.de/de/org/1/11/115/doc/gravzonen.pdf> (Stand: 03.07.2007, Abfrage: 16.07.2009)
- [18] SHIMADZU CORPORATION (Hrsg.): *Hypervision HPV-1 Instruction Manual*. Tokyo: Shimadzu Corporation
- [19] THOMAS, N. ; KELLER, H. U.: Photometric calibration of the halley multicolor camera. In: *Applied Optics* 29 (1990), April, Nr. 10, S. 1503–1519
- [20] TÖNNIES, K. D.: *Grundlagen der Bildverarbeitung*. Pearson Studium, 2005

# Danksagung

Mein ganz besonderer Dank geht an dieser Stelle an meinen Betreuer Dr. Jan Martinez Schramm für die tolle Unterstützung und Betreuung während der Bachelorarbeit.

Weiterhin bedanke ich mich bei den Mitarbeitern der Abteilung Raumfahrzeuge des DLR Jeremy Wolfram und Dr. Stuart Laurence für die Hilfestellungen mit der Bildverarbeitungssoftware, Günther von Roden, Ingo Schwendtke und den Mitarbeitern des HEG zur Verfügung Stellung verschiedener Utensilien für die Versuchsaufbauten (Stelltrafo, Lampen, ...).

Desweiteren bedanke ich mich an dieser Stelle bei Rolf Böttcher für die fachlichen Diskussionen und Ratschläge sowie für die Durchsicht der Arbeit auf Grammatik und Syntax, wofür ich mich ebenfalls bei Jeremy Wolfram und meiner Cousine Jennifer Helmholdt bedanke.

**Erklärung** nach §13(8) der Prüfungsordnung für den Bachelor-Studiengang Physik und den Master-Studiengang Physik an der Universität Göttingen:

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Abschlussarbeit selbständig verfasst habe, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe.

Darüberhinaus erkläre ich, dass diese Abschlussarbeit nicht, auch nicht auszugsweise, im Rahmen einer nichtbestanden Prüfung an dieser oder einer anderen Hochschule eingereicht wurde.

Göttingen, den 28. Juli 2009

(Sabrina Rutschmann)